

**CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE UN SISTEMA
ELÉCTRICO INDUSTRIAL CON CARGAS ELÉCTRICAS VARIABLES NO
LINEALES.**



**JUAN GUZMÁN MUÑOZ
RAMIRO HERNÁN ORTEGA BOLAÑOS**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BARRANQUILLA**

2020

**CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE UN SISTEMA
ELÉCTRICO INDUSTRIAL CON CARGAS ELÉCTRICAS VARIABLES NO
LINEALES.**

JUAN GUZMÁN MUÑOZ

RAMIRO HERNÁN ORTEGA BOLAÑOS

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico

Tutor: Vladimir Sousa Santos

Eliana Noriega Angarita

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

JURADO

Barranquilla, 2020

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a quien me ha dado la vida, ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, quien me llena de sabiduría y fortaleza para poder llevar adelante todo lo que me propongo.

Doy gracias a mis tutores MSc. Eliana María Noriega Angarita y PhD. Vladimir Sousa Santos, quienes con su dedicación, conocimiento y apoyo me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba, a mi compañero de trabajo de grado Ramiro Hernán Ortega Bolaños por este proceso educativo que encaminamos desde el grado técnico, tecnológico y hoy profesional, y a nuestro colaborador Esp. Andrés Zambrano Mejía que con su experiencia fue un gran soporte para desarrollar este proyecto.

Gracias a mi familia, por apoyarme en todo momento. En especial, quiero hacer mención de mis padres, quienes con sus abrazos y palabras de aliento me llenaron de energía, a mi esposa por ser la mejor compañera de vida, y a mi hijo que es la mayor muestra de amor, por ser mi motivación y la principal razón para seguir siempre adelante.

¡Gracias!

Juan Guzmán Muñoz.

Le agradezco a Dios por haberme guiado y acompañado en esta etapa de mi vida, por brindarme felicidad y sabiduría para afrontar cada obstáculo, por la fuerza y el coraje para hacer este sueño realidad, gracias también porque antes de ser profesional seré siempre tu hijo, ya que es el mayor privilegio que puedo tener.

Gracias a mis tutores MSc. Eliana María Noriega Angarita y PhD. Vladimir Sousa Santos, por la acertada orientación, el soporte y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento del trabajo realizado, a mi compañero de trabajo de grado Juan Guzmán Muñoz por este proceso educativo que encaminamos desde el grado técnico, tecnológico y hoy profesional, y a nuestro colaborador Esp. Andrés Zambrano Mejía que con su experiencia fue un gran soporte para desarrollar este proyecto.

Le doy gracias a mi familia por ayudarme en este camino y por estar conmigo en cada paso que doy, en especial a mis padres que me han dado aliento y sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida, a mi abuela y a mi tía que nunca dejaron de creer en mí y me apoyaron para seguir siempre adelante.

¡Gracias!

Ramiro Hernán Ortega Bolaños

Resumen

En el presente estudio, se realiza la caracterización de la calidad de la energía de un sistema eléctrico de una industria especializada en metalmecánica con cargas eléctricas variables no lineales, para la identificación de problemas que afectan la operación de los equipos. El estudio se basó en la implementación de unos pasos secuenciales basados en las características del sistema eléctrico y en los requerimientos de las normas de calidad de la energía. Se realizó mediciones en el transformador del punto de conexión común y en los doce transformadores de distribución de la planta con analizadores de redes de clase A. Como resultado del estudio, se identificaron problemas de variación de tensión y factor de potencia en todos los transformadores, y se pudo demostrar que, en 11 transformadores de distribución, existieron no conformidades en relación con los límites de distorsión total de demanda de corriente. Se pudo evidenciar que el armónico individual de corriente de quinto orden (secuencia negativa) predominó en seis transformadores, los armónicos individuales de corriente del séptimo orden (secuencia positiva) predominaron en cinco transformadores, y los armónicos individuales de corriente del tercer orden (secuencia cero), fueron los más recurrentes en un transformador.

Palabras Clave: Armónicos, Calidad de la energía, Cargas no lineales, Cargas variables, Sistemas eléctricos industriales

Abstract

In the present study, the characterization of the quality of the energy of an electrical system of an industry specialized in metalworking with non-linear variable electrical loads is carried out, for the identification of problems that affect the operation of the equipment. The study was based on the implementation of sequential steps based on the characteristics of the electrical system and the requirements of power quality standards. Measurements were made in the transformer of the common connection point and in the twelve distribution transformers of the plant with class A network analyzers. As a result of the study, problems of voltage variation and power factor were identified in all transformers, and it was shown that in 11 distribution transformers, there are non-conformities in relation to the limits of total distortion of current demand. It was possible to show that the individual harmonic of the fifth order current (negative sequence) predominated in six transformers, the individual harmonics of the seventh order current (positive sequence) predominated in five transformers, and the individual harmonics of the third order current (zero sequence).), were the most recurrent in a transformer.

Keywords: Harmonics, Power quality, Non-linear loads, Variable loads, Industrial electrical systems

Contenido

Lista de tablas y figuras	10
Introducción	12
Planteamiento del problema.....	14
Justificación	15
Objetivos	16
General	16
Específicos	16
Aspectos metodológicos	17
1 Capítulo Fundamentos de la calidad de la energía en sistemas eléctricos industriales.	18
1.1 Concepto de calidad de la energía eléctrica.	18
1.2 Antecedentes de estudios de calidad de la energía.....	19
1.3 Cargas no lineales en sistemas eléctricos.....	26
1.4 Perturbaciones de calidad de la energía	27
1.5 Equipos de medición	28
2 Capítulo Pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial.	30
2.1 Selección de los puntos de medición.	30
2.2 Ejecución de las mediciones.	32
2.3 Análisis de los parámetros de carga, factor de potencia y de calidad de la energía en los transformadores.	35
2.3.1 Análisis de tensión	35
2.3.2 Análisis de contenidos armónicos.....	36
2.3.3 Análisis de carga	38
2.3.4 Análisis del factor de potencia	38

2.3.5	Análisis de frecuencia	39
2.3.6	Indicación de eventos.....	39
2.4	Caracterización estadística de los datos.	39
2.5	Identificación de indicadores fuera de los límites establecidos.	40
3	Capítulo Resultados de la caracterización de la calidad de la energía en el caso de estudio.	40
3.1	Resultados en el punto de conexión común.	40
3.1.1	Análisis de tensión	41
3.1.2	Análisis de contenidos armónicos.....	42
3.1.3	Análisis del factor de potencia.....	44
3.1.4	Análisis de frecuencia	44
3.2	Resultados en los transformadores de distribución.	45
3.2.1	Análisis de tensión	46
3.2.2	Análisis de contenidos armónicos.....	48
3.2.3	Análisis de carga	55
3.2.4	Análisis de factor de potencia	56
3.2.5	Análisis de frecuencia	57
3.2.6	Análisis de eventos	62
3.3	Identificación de indicadores fuera de los límites.....	66
	Conclusiones	68
	Referencias.....	70
	Anexos	78

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1.1 Clasificación de perturbaciones de calidad de potencia según su duración	27
Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del analizador METREL MI2892	32
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del analizador DRANETZ HDPQVP	33
Tabla 2.3 Fecha y hora de los registros.....	34
Tabla 2.4 Límites de variación de tensión para sistemas generales.....	35
Tabla 2.5 Clasificación, denominación y valores de tensión nominal.....	36
Tabla 2.6 Porcentaje máximo de desequilibrio de tensión	36
Tabla 2.7 Límites de distorsión armónica de tensión	37
Tabla 2.8 Límites de distorsión de demanda de corriente para sistemas con tensiones de 120 V hasta 69 kV	38
Tabla 2.9 Valores de referencia de variaciones de frecuencia.....	39
Tabla 3.1 Resumen de los resultados registrados en punto de conexión común	40
Tabla 3.2 Valores registrados de variación de tensión	41
Tabla 3.3 Valor registrado desequilibrio de tensión	41
Tabla 3.4 Resultado del análisis de índices de armónicos de tensión.....	42
Tabla 3.5 Límites de armónicos de corriente en punto de conexión común.....	43
Tabla 3.6 Resultado del análisis de armónicos de corriente	43
Tabla 3.7 Resultado análisis frecuencia.....	45
Tabla 3.8 Resumen de los resultados registrados en transformador de 250 kVA	45
Tabla 3.9 Valores registrados de variación de tensión	46
Tabla 3.10 Valor registrado desequilibrio de tensión	47
Tabla 3.11 Resultado del análisis de índices de armónicos de tensión.....	49
Tabla 3.12 Resultado del análisis de armónicos de corriente	53
Tabla 3.13 Límites de armónicos de corriente.....	54
Tabla 3.14 Rango según el orden individual de armónicos de corriente	54
Tabla 3.15 Valores máximos de potencia registrados	56
Tabla 3.16 Resultado análisis frecuencia.....	58
Tabla 3.17 Valores máximos registrados en transformadores de distribución.	58
Tabla 3.18 Eventos de tensión en puntos de registro.....	62

Tabla 3.19 Resumen del análisis de variables de calidad	66
---	----

Figuras

Figura 2.1 Disposición de los analizadores de red en el sistema eléctrico..	31
Figura 2.2 Analizador de redes METREL MI 2892..	33
Figura 2.3 Analizador de redes DRANETZ HDPQVP.	33
Figura 3.1 Perfil factor de potencia frontera comercial..	44
Figura 3.2 Variación de tensión vs límites establecidos por la norma.....	46
Figura 3.3 Desequilibrio de tensión de línea.	47
Figura 3.4 Distorsión armónica total en tensión.	48
Figura 3.5 Armónicos individuales de tensión.	49
Figura 3.6 Promedio por orden de armónicos individuales de tensión.....	50
Figura 3.7 Distorsión de demanda en corriente..	51
Figura 3.8 Armónicos individuales de corriente orden $3 \leq h < 11$	52
Figura 3.9 Armónicos individuales de corriente orden $11 \leq h < 17$	52
Figura 3.10 Armónicos individuales de corriente orden $17 \leq h < 23$	53
Figura 3.11 Promedio por orden de armónicos individuales de corriente.	54
Figura 3.12 Consumo de corriente durante el periodo de medición.	55
Figura 3.13 Consumo de potencia activa, reactiva y aparente.....	56
Figura 3.14 Tendencia de factor de potencia.	57
Figura 3.15 Tendencia de frecuencia.	57

Introducción

La calidad de la energía eléctrica es uno de los aspectos que caracteriza el funcionamiento de un sistema eléctrico (Jasinski et al., 2018) que ha sido objeto de estudio sistemático (Yadav et al., 2019). Esto es debido a que, si los parámetros de calidad de energía se encuentran fuera de los límites establecidos por las normas, las cargas conectadas al sistema eléctrico se verían afectadas, ocasionando pérdidas económicas significativas. Estas pérdidas comúnmente se reflejan en paradas de la producción, así como daños y disminución de la vida útil de los equipos (Jafari Aghbolaghi et al., 2017). Así mismo, se puede afectar la red pública y otros usuarios conectados al sistema eléctrico, como los sistemas eléctricos industriales (Metrel, 2017).

En la actualidad, el desarrollo de la electrónica ha permitido mejorar la calidad, la confiabilidad, eficiencia y seguridad de los procesos industriales (Metrel, 2017) (Raja et al., 2020) (Nuñez et al., 2021). Un claro ejemplo es, la introducción las cargas no lineales, tales como, la iluminación LED, los variadores de velocidad, y los controladores para automatización de procesos, inversores, plantas solares (Shah et al., 2019), entre otros. Sin embargo, este desarrollo conlleva a que los equipos usados en la industria tengan una mayor sensibilidad a las perturbaciones de calidad de la energía que se generan en los sistemas eléctricos (Rönnberg & Bollen, 2016) (Rajarajan & Prakash, 2020).

Los problemas de calidad de la energía toman gran relevancia cuando se tienen diferentes tipos de cargas (Choi et al., 2018). La presencia de cargas no lineales, combinadas con cargas altamente variables originan problemas de calidad de la energía, que causan fallas en equipos electrónicos sensibles, en baterías de condensadores, en conmutadores y señalizadores, en el cableado, y en el parpadeo de la luz. (Metrel, 2017).

El Gobierno de Colombia a través del Ministerio de Minas y Energía (MINMINAS) y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), ha establecido la normatividad y directrices para realizar estudios y diagnóstico de calidad de la energía, en las instalaciones eléctricas del territorio nacional (Churio Silvera et al., 2018). Se destacan en estos documentos el uso de las normas NTC 1340 (ICONTEC, 2013) y NTC 5001 (ICONTEC, 2008), las cuales se complementan con la normativa internacional IEEE std 519 (D. Committee et al., 2014) e IEEE std 1159 (D. Committee et al., 2009).

El presente trabajo se desarrolla en una empresa especializada en metalmecánica para equipos mineros, la cual se encuentra estructurada de la siguiente manera: En el capítulo uno se abordan los requerimientos de calidad de la energía que deben cumplirse en un sistema eléctrico industrial. En el segundo capítulo se describen los pasos para la caracterización de calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial. En el tercer capítulo se presentan los resultados de la aplicación de los pasos en un caso de estudio con cargas eléctricas variables no lineales y se determinan si los datos registrados cumplen o no los límites establecidos en las normas antes mencionadas.

Planteamiento del problema

Según (Rönnberg & Bollen, 2016) la sociedad se ha desarrollado hasta la actualidad a través de diferentes cambios económicos, sociales, culturales, políticos, y otros aspectos, entre los cuales la transformación de los sistemas eléctricos de potencia, no han sido ajenos.

La caracterización de los problemas de calidad de la energía de un sistema operando bajo el régimen de cargas eléctricas variables es diferente a un sistema eléctrico que trabaja con cargas eléctricas estables, debido a que la alta variabilidad en el tiempo en los parámetros eléctricos requiere un análisis dinámico y el uso de herramientas estadísticas. (D. Committee et al., 2014) (Carrera & Ordoñez, 2011).

La investigación se fundamenta en la necesidad de identificar las causas de problemas que se presentan en una industria especializada en metalmecánica para equipo minero ubicada en el departamento del Atlántico, Colombia. En esta empresa se tienen presentes cargas eléctricas variables que presentan problemas de calidad de la energía, los cuales han ocasionado falencias en la operación normal de los equipos de planta, como el daño de tarjetas electrónicas, fallas en la coordinación de protecciones, disminución de la vida útil de equipos eléctricos, presencia de corrientes parásitas en conductores de tierra, calentamiento en conductores eléctricos, ineficiencia de equipos y altos consumos de potencia reactiva. Todo esto reflejado en pérdidas económicas significativas, por tanto, se hace imprescindible la siguiente pregunta de investigación.

¿Será posible identificar los problemas relacionados con el suministro eléctrico de un sistema industrial con cargas eléctricas variables no lineales, mediante la caracterización de la calidad de la energía eléctrica?

Justificación

En la actualidad, la minería tiene un papel fundamental en la industria global, por lo cual se busca el mejoramiento continuo de los procesos industriales para ser más eficiente y dar a sus clientes un costo por tonelada cada vez más competitivo (Yaghoobi et al., 2019), Los más altos estándares de rendimiento se lograron obtener a través de la implementación de diferentes tecnologías que permitieron automatizar y aumentar la eficiencia en la producción (Monzón, 2013). Estos avances han sido posibles por el desarrollo de la electrónica dentro de los procesos, mediante la implementación de dispositivos que tienen un comportamiento variable y no lineal. Estos dispositivos son altamente sensibles a las perturbaciones que se presentan en el sistema eléctrico que alimenta dichas cargas, por lo tanto, se debe garantizar la calidad de la energía y así permitir que los equipos trabajen de manera óptima y confiable (Enríquez Harper, 2013).

En este trabajo, se caracterizará un sistema eléctrico industrial con cargas eléctricas variables no lineales. Esta caracterización se hace necesaria debido a que en la empresa caso de estudio se han presentado problemas como el daño de tarjetas electrónicas, cableado de puesta a tierra y de elementos del banco de condensadores. En estudios de calidad de la energía realizados previamente en la empresa seleccionada, se han identificado algunos problemas de calidad de la energía.

Estos análisis sin embargo han sido insuficientes, pues no se ha profundizado en parámetros como los armónicos de corriente, ni se han empleado herramientas estadísticas que permiten profundizar en el diagnóstico de los problemas, aspecto que es imprescindible en el caso de predominio de cargas no lineales y variables.

Objetivos

General

Caracterizar la calidad de la energía de un sistema eléctrico industrial identificando los problemas causados por las cargas eléctricas no lineales.

Específicos

Realizar un estudio documental sobre los requerimientos de calidad de la energía que debe cumplirse en un sistema eléctrico industrial.

Describir los pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial.

Aplicar los pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un caso de estudio con cargas eléctricas variables no lineales.

Aspectos metodológicos

Este trabajo se encuentra estructurada en tres fases que guardan coherencia con los objetivos específicos del proyecto.

En la primera fase, se realiza un estudio documental sobre los requerimientos de calidad de la energía que deben cumplirse en un sistema eléctrico industrial. Para esto se efectuó una búsqueda de información especializada en las bases de datos IEEE, Web of Science, SCOPUS, entre otros, sobre los procedimientos existentes para la caracterización de un sistema eléctrico industrial, y se investigaron las normas nacionales e internacionales que establecen los límites de los parámetros de calidad de la energía.

En la segunda fase, se describen los pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial. Para esto se establecieron y se explicaron los pasos del procedimiento utilizado, además, se definieron los parámetros de calidad de la energía evaluados.

En la tercera fase, se aplican los pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un caso de estudio con cargas eléctricas variables no lineales. Para esto se analizaron el transformador del punto de conexión común y los transformadores de distribución, los registros obtenidos por los analizadores de redes se tabularon en Microsoft Excel, se compararon con los límites establecidos en las normas investigadas y se graficaron para la interpretación de los resultados obtenidos.

1 Capítulo Fundamentos de la calidad de la energía en sistemas eléctricos industriales.

1.1 Concepto de calidad de la energía eléctrica.

Desde 1980 en el sector de la electricidad se ha mostrado un alto interés en el término “calidad de la energía”. Diferentes ocurrencias en el campo electromagnético están presentes en el sistema interconectado de energía, estas influyen en cualquier momento y lugar, particularmente en los niveles de tensión y corriente ocasionando perturbaciones y fallas en los equipos conectados a la red. Es por esto que, proveedores, distribuidores y consumidores están interesados en preservar la calidad de la energía en sus niveles nominales (Jafari Aghbolaghi et al., 2017).

La calidad de la energía se ha definido de varias formas que en esencia tienen el mismo significado. De acuerdo con (Jafari Aghbolaghi et al., 2017), para la industria, la calidad de la energía se define como “Tener la confiabilidad de 99.98% en un sistema eléctrico de potencia”; para los productores de equipos se define como “el conjunto de características de la fuente de potencia que permite que los equipos eléctricos trabajen apropiadamente”, para (Jafari Aghbolaghi et al., 2017), se define como “cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de tensión, la corriente o la frecuencia, que resulta en una falla o mal funcionamiento de los equipos del cliente, para la norma IEEE Std 1159 (D. Committee et al., 2009) se define como “la variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan a la tensión y la corriente en un determinado y en una localización determinada en el sistema de energía”, y para la norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2015), se define como “las características de la electricidad en un punto determinado del sistema eléctrico, evaluado frente a una serie de parámetros técnicos de referencia.

1.2 Antecedentes de estudios de calidad de la energía

Debido a la importancia de analizar los efectos que produce tener una deficiente calidad de la energía, se han realizado varios estudios sobre estos problemas en circuitos eléctricos industriales. Estos estudios se caracterizaron por evaluar parámetros de calidad de la energía como la corriente, nivel de tensión, frecuencia, factor de potencia, entre otros; en este trabajo se evalúan además distorsiones armónicas de corriente y tensión. Estas variables fueron analizadas con el objetivo de hallar las perturbaciones en las formas de onda e identificar las causas a los fenómenos anómalos que se presentan en los sistemas eléctricos evaluados. A continuación, se describen algunos de estos estudios.

En (Monzón, 2013) se realiza un estudio de la calidad de la energía del suministro eléctrico en una industria del sector aeronáutico en España, en la cual se diseñan y construyen las piezas para el ensamble de aviones. La fabricación se realiza mediante motores, máquinas de soldar y mesas de corte. Estos equipos han sufrido daños de las piezas, pérdidas de información y desconfiguración, debido a la aparición de huecos de tensión. En el estudio realizado a la planta se centran en el análisis del parámetro de tensión cuando ocurren los huecos o “sags” (caídas de tensión nominal entre el 0,9 y 0,1 p.u). En este estudio no se realizó un análisis de los armónicos de tensión y corriente, el estudio se centra en los huecos de tensión. Adicionalmente, las cargas eléctricas analizadas no son variables. El análisis de los huecos de tensión se realizó en un solo punto de medición.

En (SECOVI, 2006) se realiza un estudio de calidad de la energía en una planta de fabricación de piezas de vehículos motorizados, ubicada en México. Se realiza un análisis del sistema eléctrico de potencia de la planta de fabricación, hallando problemas de fluctuaciones de tensión y corrientes armónicas. Los parámetros analizados son niveles de tensión, fluctuaciones

en la tensión, armónicos de corriente y tensión, cargabilidad y factor de potencia. En este estudio el analizador de redes se conectó en un solo punto durante 72 horas, las cargas eléctricas no son variables. Para el análisis de armónicos se evalúan el THDv y THDi. La caracterización de los armónicos de corriente se realiza con el parámetro distorsión armónica total (THD), en lugar de la distorsión total de demanda de corriente (TDD), como lo establece la norma IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014).

En (Torres, Ibarra 2004) se realiza un estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico de una planta de elaboración de hormigón, ubicada en Guayaquil, Ecuador. En este documento se hace un análisis de los parámetros de tensión, corriente y frecuencia de la planta, identificando problemas de armónicos, parpadeo y factor de potencia. Este estudio surge a partir de los problemas que se han presentado en la planta como quema de conductores de puesta a tierra, parpadeos en las luminarias de las oficinas. En el estudio se encuentra que en general se cumplen los niveles establecidos por la norma en cuanto a las distorsiones armónicas y niveles de tensión, sin embargo, el fenómeno de parpadeo sí sobrepasa el límite. En esta investigación no se tuvo en cuenta el análisis de TDD, solo se evaluó en THDi. Se ejecuta la medición en tres puntos en diferentes épocas del año.

En (Jiménez, 2015) se presenta un estudio de calidad de la energía y el factor de potencia en la hidroeléctrica Caldas, Colombia. En esta tesis se propone una guía metodológica que permita evaluar la severidad de hundimientos de tensión que afectan el suministro eléctrico en tres sectores: subestación, sector comercial y sector industrial. Se concluye que la regulación del país requiere mayor profundización para la evaluación completa de estos fenómenos. Se elabora la metodología y se aplican en los casos de estudio mencionados. Este estudio se basa en el análisis específico a los huecos de tensión que se presentan en el sistema eléctrico de la

hidroeléctrica. No se evaluaron los armónicos de tensión y corriente. El análisis se realizó en media tensión en la cadena de generación. Lo anterior se enfoca en los huecos de tensión sin tener en cuenta los demás parámetros de calidad de la energía para realizar un análisis completo.

En (Churio Silvera et al., 2018) se desarrolla un estudio de calidad de la energía y el factor de potencia en un campus universitario de la costa caribe colombiana. En este trabajo se realiza un diagnóstico de las instalaciones eléctricas existentes y posteriormente se conecta un equipo de medición para evaluar las variables eléctricas. Se concluye que los niveles de distorsión armónica en tensión y corriente se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, sin embargo, se encontró un factor de potencia por fuera de los límites permitidos. En este artículo se analizó los parámetros de tensión, corriente y factor de potencia evaluando las distorsiones armónicas, la cargabilidad, el factor de potencia y el sistema de puesta a tierra del campus universitario. En este estudio las cargas analizadas no son variables, no se analizaron las interrupciones de tensión y desequilibrio de tensión.

En (Ingale et al., 2018) se realiza un estudio de calidad de la energía, enfocado en el análisis de los armónicos que se generan a partir del uso de variadores de frecuencia en una industria azucarera. Las cargas de esta industria están conectadas a una planta de cogeneración. En la planta se tienen 8 transformadores en los cuales se realizaron mediciones durante 2 horas. Se analizaron las variables de THDv y THDi. Se concluye que existen 3 puntos que se encuentran por fuera de lo establecido por la norma. En este trabajo no se analizaron las interrupciones de tensión y el desequilibrio. Este estudio se enfoca en un grupo reducido de parámetros de calidad de la energía.

En (Bhagavathy et al., 2018) se realiza un estudio de calidad de la energía evaluando la importancia del factor de potencia en una planta textil ubicada en la India. Se instala un equipo

de medición en el transformador principal de la planta y se toman los datos del factor de potencia en un periodo de 14 horas. En este estudio no se realiza una evaluación de parámetros como armónicos, interrupciones de tensión, desequilibrio de tensión., huecos de tensión. Este estudio se enfoca en un grupo limitado de parámetros de calidad de la energía, sin analizar conjuntamente problemas en estado transitorio y estacionario.

En (Noriega et al., 2019), se mejora el rendimiento energético de una fábrica de baterías en Colombia mediante el enfoque de planificación y gestión de la energía definido en la ISO 50001. En el estudio, se identificaron los consumos de energía más significativos en el proceso de producción de batería, en el sistema de aire comprimido y en los motores eléctricos. Para ello, se realizó un análisis de calidad de la energía con analizadores de redes clase A. En este trabajo se evalúan parámetros eléctricos como la tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente, factor de potencia, índices de armónicos, entre otros. No se realiza análisis de contenidos armónicos individuales, no se evalúa TDDI, cargabilidad y frecuencia.

En (Singh, 2005), se observa que el inversor PWM podría aumentar las pérdidas de cobre de los motores en más del 50%. En (Movahed et al., 2010) y (Orace, 2000), una curva de reducción de la vida del motor en función de armónicos de quinto orden, muestra que la esperanza de vida del motor comienza a reducirse a partir de un valor de distorsión de tensión individual (IVD) del 3%. En (Inan & Attar, 2000), la temperatura de funcionamiento de un motor de 1,5 kW aumentó en un 6,8% y se observa una posible reducción de la vida útil del 44,5%, cuando se alimenta de un inversor de tiristores de tipo puente trifásico. Solo se realiza el análisis de armónicos sin tener en cuentas las demás perturbaciones de calidad de la energía.

Algunos estudios demuestran que los armónicos de quinto y séptimo orden son los más perjudiciales para el funcionamiento del motor (De Abreu & Emanuel, 2002), (Sousa et al.,

2015). En (De Abreu & Emanuel, 2002), un motor de 100 HP alimentado con un 6% de IVD de armónicos de quinto orden, redujo su vida útil en un 18%. En (Sousa et al., 2015), se demuestra que la eficiencia se reduce en un 3%, en un motor de 1,5 kW operando en presencia de armónicos de quinto y séptimo orden. Este estudio se enfoca en un grupo limitado de parámetros de calidad de la energía. Por lo general, no se usan herramientas estadísticas avanzadas.

Los armónicos también tienen efectos significativos en la frecuencia de oscilación del par y las vibraciones (Donolo et al., 2016). Los estudios demuestran que con valores típicos de distorsión armónica combinados con los máximos niveles de desequilibrio de voltaje permitidos por (D. Committee et al., 2009), son suficientes para introducir niveles de vibraciones bajo los cuales no se recomienda el funcionamiento continuo del motor de inducción (Donolo et al., 2016). Este estudio se enfoca en un grupo limitado de parámetros de calidad de la energía.

La corriente de descarga de los cojinetes es un efecto importante causado por los conductores PWM en los motores (Wang, Liu, et al., 2014), (Wang, Bai, et al., 2014). Este fenómeno, producido por el voltaje de modo común del inversor PWM, provoca un aumento de la fricción entre las pistas y los rodillos y un daño del rodamiento en poco tiempo. Otros estudios muestran que la programación inadecuada de la relación de modulación de amplitud (M) y la frecuencia de conmutación (f_c) de los conductores PWM, aumenta significativamente las pérdidas de corrientes de Foucault de los motores, reduciendo su eficiencia (Zhu et al., 2008), (Strandt et al., 2014). En este estudio no se realiza una evaluación de los problemas de calidad de la energía adicionales que se pueden presentar en el sistema.

Las pérdidas y la vida útil de los transformadores dependen del nivel de armónicos y de la carga del transformador (Said et al., 2010). En (Digalovski et al., 2013), se observa que las pérdidas en el núcleo podrían aumentar hasta un 15% en un transformador de distribución

trifásico, debido a los efectos de la corriente de armónicos de orden superior producida por las cargas domésticas no lineales. Este estudio se enfoca en el análisis de corriente, sin embargo, no se tuvieron en cuenta las perturbaciones que se presentan en la tensión.

El Factor K es un parámetro utilizado para el análisis de los efectos de la corriente de armónicos en las pérdidas del transformador y la reducción de la expectativa de vida (Massey, 1994), (Bishop, 1996), (Pierce, 1996). Utilizando el Factor K se puede calcular el calentamiento adicional en los devanados de los transformadores asociado a las corrientes armónicas (Massey, 1994). El Factor K se utiliza en (Bishop, 1996) para estudiar la reducción potencial de la vida útil del transformador. Para un transformador de distribución de 25kVA de tipo polo sumergido en aceite, trabajando con (Factor $K=12$), la temperatura relativa aumenta en $6,6^{\circ}\text{C}$ en el núcleo del transformador. En (Pierce, 1996) se analiza la influencia de los armónicos generados por los variadores de velocidad en el diseño y aplicación de los transformadores. Este estudio se enfoca en el análisis de las corrientes armónicas, sin tener en cuenta los demás parámetros de calidad de la energía.

Los principales efectos sobre los condensadores que trabajan en presencia de armónicos son la ruptura prematura de los dieléctricos, el aumento de la temperatura y el crujido de la batería de condensadores (Chen & Cheng, 1988), (Boonseng et al., 2001). En (Chen & Cheng, 1988), se muestra que cada orden armónico afecta de manera diferente al dieléctrico del condensador, entre estos, los armónicos de tercer orden son los más perjudiciales (Chen & Cheng, 1988). El fallo del dieléctrico en condensadores de potencia de baja tensión debido a los efectos de resonancia armónica se analiza en (Boonseng et al., 2001). El estudio realizado en 25 bancos de condensadores mostró que los armónicos con voltaje THD superior al 5% causaron que el 56% de los bancos tuvieran una vida útil de sólo hasta 4 meses (Boonseng et al., 2001).

Este estudio se enfoca las corrientes armónicas sin tener en cuenta los demás parámetros de calidad de la energía.

Debido a los temas discutidos, la evaluación de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos industriales es importante para identificar la presencia de altos niveles de armónicos y tomar acciones para reducir sus efectos en los motores, condensadores, transformadores y otros dispositivos (Souli & Hellal, 2014). En (Said et al., 2010) se realiza un estudio de la calidad de la energía en los transformadores de doble distribución de dos edificios de una Universidad. En (Digalovski et al., 2013), se analiza la calidad de la energía en un transformador de distribución que alimenta una red eléctrica residencial. En (Rawa et al., 2013), se caracteriza la calidad de la energía y los armónicos en un circuito eléctrico con ordenadores personales. En (Aramwanid & Boonyaroonate, 2015) se estudia el impacto del proceso centrífugo del azúcar en la calidad de la energía de la red eléctrica de una industria azucarera. Las pérdidas de energía debidas a los armónicos generados por las cargas no lineales en las cargas residenciales, comerciales y de oficinas se estudian en (Miron et al., 2012). Este estudio se enfoca en un grupo limitado de parámetros de calidad de la energía, sin analizar conjuntamente problemas en estado transitorio y estacionario.

En resumen, estos estudios se enfocan en un grupo limitado de parámetros de calidad de la energía, sin analizar conjuntamente problemas en estado transitorio y estacionario. Por lo general, no se usan herramientas estadísticas, y la caracterización de los armónicos de corriente se realiza con el parámetro distorsión armónica total (THD), en lugar de la distorsión total de demanda de corriente (TDD), como lo establece la norma IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014).

En la presente investigación se realiza la caracterización de la calidad de la energía de un sistema eléctrico de una industria con predominio de cargas eléctricas variables no lineales, para la identificación de problemas que afectan la operación de los equipos. Se analizan un amplio espectro de parámetros de calidad de la energía que incluyen parámetros de estado estacionario (variaciones y desequilibrio de tensión, armónicos, etc.), transitorios (interrupciones de corta duración, hundimientos y elevaciones) y otros de carácter energético como el factor de carga y el factor de potencia. Los armónicos de corriente se analizan empleando la distorsión total de demanda de corriente (TDD), como lo establece la norma IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014).

En la evaluación se utilizan herramientas estadísticas como los valores mínimo, máximo y promedio, posibilitando construir una imagen apropiada de la distribución relativa del grupo de datos, se usa además la función de distribución de probabilidad para identificar el porcentaje de los datos que sobrepasan los límites establecidos por las normas.

En análisis se realizó en 13 transformadores, un transformador del punto de conexión común y doce transformadores de distribución de la planta mediante las mediciones simultáneas durante 10 días.

1.3 Cargas no lineales en sistemas eléctricos

En los inicios de la revolución industrial de la electricidad (a finales del siglo XIX), los países económicamente desarrollados se enfocaron en sacarle el mayor provecho para mejorar su calidad de vida mediante el uso de la energía eléctrica. Se comenzó con la iluminación de las calles, instalaciones eléctricas para las viviendas y se impulsó la mejora de las industrias. Se llegó a un momento en el que se tuvo tanta carga eléctrica que la capacidad de las redes locales se sobrecargaba, lo cual se convirtió en un gran problema al frenar el desarrollo de los países

(Cervantes, 2014). A raíz de la limitante de las redes eléctricas para suplir la demanda eléctrica de los usuarios, en los países se realizaron inversiones para mejorar el uso eficiente de la energía eléctrica, destacándose entre otras acciones el incremento en el uso de la electrónica de los dispositivos utilizados en la industria, las telecomunicaciones y el sector terciario.

Los dispositivos electrónicos como los variadores de velocidad, hornos eléctricos, equipos de soldadura, computadores entre otros, lograron mejorar significativamente la velocidad, el control, la seguridad y las tareas complejas de muchos procesos, permitiendo obtener un consumo de energía eléctrica significativamente. No obstante, estos dispositivos electrónicos están compuestos principalmente por semiconductores, que son elementos no lineales con unas características de operación que producen perturbaciones en la forma de onda de la tensión y corriente. A su vez, estos elementos tienen una alta sensibilidad a las perturbaciones eléctricas del sistema, y se pueden averiar con facilidad (Metrel, 2017).

1.4 Perturbaciones de calidad de la energía

La norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), establece la siguiente clasificación general como se observa en la Tabla 1.1, la cual describe las perturbaciones que afectan la calidad de la potencia eléctrica, de acuerdo con la duración de los fenómenos, así:

Tabla 1.1

Clasificación de perturbaciones de calidad de potencia según su duración

Perturbaciones	Tipo
Larga duración o permanentes	Variaciones de tensión de estado estable
	Desequilibrio de tensión
	Parpadeo “Flicker”
	Interrupciones de larga duración (duración ≥ 1 min)
	Armónicos de tensión
	Armónicos de corriente

	Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones)
Lentas	Interrupciones de corta duración (duración < 1 min)
	Hundimientos (“Sags”)
	Elevaciones (“Swells”)
	Variaciones de frecuencia
Rápidas	Sobretensiones transitorias

Nota: Elaboración propia a partir de (ICONTEC, 2008)

1.5 Equipos de medición

Para la medición de las perturbaciones de calidad de potencia eléctrica establecidos en la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), los instrumentos, equipos o analizadores de redes a utilizar deben estar acordes con los métodos y procedimientos establecidos en la norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2015).

Un analizador de redes es un equipo de alta tecnología, que permite medir y monitorear al usuario una gran variedad de parámetros eléctricos en una instalación o equipo eléctrico, durante los periodos de tiempo requerido por el usuario. La información de las variables medidas permiten realizar análisis de estudios de carga, evaluaciones de energía, mediciones de armónicos, captura de sucesos de tensión y ejecutar análisis de distorsiones en la forma de onda de tensión y tensión (MaesWell, 2017).

Los analizadores de redes disponen de las siguientes funciones de medición:

- Tensión: TRMS, pico, factor de cresta (4 canales).
- Corriente: TRMS, pico, factor de cresta (4 canales).
- Potencia (activa, reactiva, aparente).
- Mediciones de potencia según IEEE 1459 (activa, no activa, fundamental, armónicos, desequilibrio de cargas).
- VFD (variadores de frecuencia, 5 Hz – 110 Hz), 400 Hz.

- Desequilibrio, medición de parpadeo.
- Análisis de armónicos e inter armónicos hasta el armónico 50, medición de THD.
- Captura y registro de eventos en el suministro eléctrico (desconexiones, interrupciones, subidas, caídas).
- Monitorización y registro de corrientes de arranque.
- Registro de sobretensiones transitorias.
- Análisis de la calidad de la energía según la norma EN 50160, IEEE 519.
- Factor de potencia.

La norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), establece dos tipos de medidas para los analizadores de redes:

- **Medidas de clase A:** deben emplearse medidores clase A, cuando se requiere de medidas precisas para efectos de aplicaciones contractuales, verificación del cumplimiento de los valores de referencia estipulados en esta norma o en el caso de resolver reclamaciones o disputas entre un operador de red y un cliente.
- **Medidas de clase B:** medidores clase B podrán emplearse para investigaciones estadísticas, estudios de diagnóstico en instalaciones y otras aplicaciones donde no se requiere una alta precisión o baja incertidumbre.

2 Capítulo Pasos para la caracterización de la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial.

Para la caracterización de la calidad de la energía en el sistema eléctrico industrial objeto de estudio, se aplicaron los siguientes pasos basados en una secuencia lógica de implementación y las normas NTC 5001 (ICONTEC, 2008), NTC 1340 (ICONTEC, 2013) e IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014).

2.1 Selección de los puntos de medición.

Se realiza un análisis previo para identificar las cargas que están siendo mayormente afectadas por problemas de calidad de la energía. Se evalúan causas como el daño de tarjetas electrónicas, las cargas con mayor consumo de potencia, y puntos donde se tengan equipos críticos para la operación.

El estudio se desarrolló en un taller en el cual se realizan actividades de diseño, manufactura y reparación de componentes estructurales mediante la fabricación, soldadura, y recuperación de tren de rodaje de maquinaria minera. El taller presenta cargas no lineales como equipos de cómputo en su central de monitoreo los cuales son empleados para el mantenimiento predictivo a través de plataformas virtuales, y los sistemas de iluminación LED en las oficinas administrativas y en la cocina, además cargas variables no lineales en su centro de reconstrucción de componentes que cuenta con equipos como, máquinas de soldar, magna-flux para ensayos no destructivos, cortadora de plasma, “sandblasting”, “steelabrator”, lavadoras industriales, dinamómetro para motores, pulidoras y taladros, entre otros.

El registro de las variables eléctricas se hizo para los 13 puntos de interés dentro de las instalaciones:

1. Punto de conexión común –13,8kV.
2. Transformador principal 3 MVA.
3. Transformador central de monitoreo 30 kVA.
4. Transformador 10 kVA.
5. Transformador 75 kVA cocina.
6. Transformador 75 kVA cuarto técnico.
7. Transformador 60 kVA cuarto técnico.
8. Transformador 250 kVA.
9. Transformador 112,5 kVA.
10. Transformador de servicios 45 kVA.
11. Transformador 75 kVA dobladora #1.
12. Transformador 75 kVA #1 dobladora #2.
13. Transformador 75 kVA #2 dobladora #2.

Se muestra en la Figura 2.1 la disposición de los analizadores de redes en el diagrama unifilar.

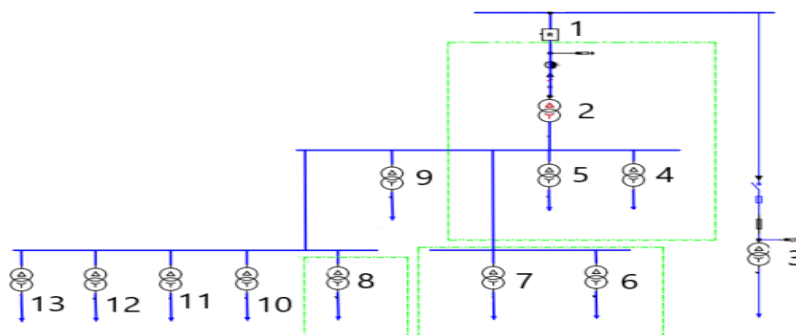


Figura 2.1 Disposición de los analizadores de red en el sistema eléctrico. Elaboración propia.

2.2 Ejecución de las mediciones.

Las mediciones se realizaron durante diez días. Se toma este periodo con el fin de evaluar el comportamiento en una semana completa, y se toman medidas tres días adicionales para comparar el comportamiento con los primeros tres días.

Para el registro de variables eléctricas se utilizaron analizadores de redes clase A, cinco de marca Metrel y ocho de marca Dranetz. En la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se muestran las especificaciones técnicas de los analizadores de redes, así mismo en la Figura 2.2 y Figura 2.3 se muestran imágenes de los analizadores de redes Metrel y Dranetz respectivamente.

Tabla 2.1

Especificaciones técnicas del analizador METREL MI2892

Funciones	Rango de medida	Precisión
Potencia (P, Q, S, cos Θ , PF)	Depende de la tensión y las pinzas seleccionadas	IEC 61557-12 Clase 1
Energía	Depende de la tensión y las pinzas seleccionadas	Activo: IEC 62053-21 Clase 1 Reactivo: IEC 62053-23 Clase 2
Armónicos (DC / 50th)	0 ÷ 20% de tensión nominal	IEC 61000-4-7 Clase 1
Inter armónicos (1 / 50th)	0 ÷ 20% de tensión nominal	IEC 61000-4-7 Clase 1
Señalización básica	0 ÷ 15% de tensión nominal	IEC 61000-4-30 Clase A
Desequilibrio	Tensión 0 ÷ 5% Corriente 0 ÷ 17%	
Caídas, Aumentos	10 ÷ 150 % de tensión nominal	$\pm 0,2\%$ de tensión nominal ± 1 ciclo
Interrupciones	0 ÷ 10 % de tensión nominal	± 1 ciclo

Nota: Elaboración propia a partir de (Metrel d.d, 2020)



Figura 2.2 Analizador de redes METREL MI 2892. Tomado de (Metrel d.d, 2020).

Tabla 2.2

Especificaciones técnicas del analizador DRANETZ HDPQVP

Funciones	Rango de medida	Precisión
Tensión	0-1000VRMS $\pm 0,1\%$	IEC 61000-4-30 Clase A
Armónicos (DC / 50th)	0 ÷ 20% de tensión nominal	IEC 61000-4-7 Clase 1
Inter armónicos (1 / 50th)	0 ÷ 20% de tensión nominal	IEC 61000-4-7 Clase 1
Frecuencia	42,5 - 69Hz	$\pm 0,01\text{Hz}$
Potencia (P, Q, S, cos Θ)	Depende de la tensión y las pinzas seleccionadas	IEEE 1459:2000
PF	-1 a 0 a 1	IEEE 1459:2000

Nota: Elaboración propia a partir de (Dranetz, 2020)



Figura 2.3 Analizador de redes DRANETZ HDPQVP. Tomado de (Dranetz, 2020)

El periodo de medición fue de 10 días, tomando muestras cada 1 minuto. La fecha de inicio y finalización de los registros, se muestran en la Tabla 2.3

Tabla 2.3

Fecha y hora de los registros

Punto de registro	Equipo de Medición	Fecha y hora inicio [dd.mm.aaaa / hh:mm]	Fecha y hora final [dd.mm.aaaa / hh:mm]
Punto de conexión común	HDPVAKA086	23/04/2019 – 10:53	03/05/2019 – 11:41
Transformador principal 3 MVA.	HDPVALA105	23/04/2019 – 12:03	03/05/2019 – 12:42
Transformador central de monitoreo 30 kVA.	MI 2892 15340068	24/04/2019 – 10:28	04/05/2019 – 16:25
Transformador de servicios 45 kVA.	PVUSIA091	25/04/2019 – 09:52	04/05/2019 – 10:38
Transformador 10 Kva	MI 2892 14470435	23/04/2019 – 12:49	03/05/2019 – 08:42
Transformador 75 kVA cocina	MI 2892 14470481	23/04/2019 – 13:57	03/05/2019 – 09:34
Transformador 75 kVA técnico	MI 2892 14160393	23/04/2019 – 16:17	03/05/2019 – 10:54
Transformador 75 kVA dobladora #1	MI 2892 13420493	25/04/2019 – 13:51	06/05/2019 – 09:09
Transformador 75 kVA #1 dobladora #2	MI 2892 13420496	25/04/2019 – 10:47	04/05/2019 – 09:40
Transformador 75 kVA #2 dobladora #2	MI 2892 18370219	27/04/2019 – 09:27	04/05/2019 – 11:03
Transformador 112,5 kVA	PVUSIA055	24/04/2019 – 14:24	04/05/2019 – 11:32
Transformador 250 kVA	HDPVAKA059	24/04/2019 – 15:19	04/05/2019 – 09:44
Transformador 60 kVA técnico	MI 2892 14160466	24/04/2019 – 11:49	03/05/2019 – 10:43

Nota: Elaboración propia

2.3 Análisis de los parámetros de carga, factor de potencia y de calidad de la energía en los transformadores.

Se definieron los siguientes parámetros y límites para la evaluación de calidad de la energía:

2.3.1 Análisis de tensión

El comportamiento de la tensión se analiza de acuerdo a sus variaciones con respecto a la tensión nominal y al desequilibrio que se presente entre las tensiones de cada fase.

2.3.1.1 Variaciones de tensión

Las variaciones de tensión pueden evaluarse tanto para sistemas generales como para sistemas que alimenten equipos electrónicos. Se debe tener en cuenta que si se requiere pueden evaluarse ambos límites a la vez en el mismo punto de registro.

2.3.1.1.1 Sistemas generales

Los perfiles de tensión en el sistema son analizados de acuerdo con las recomendaciones de la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), en la cual se establecen los valores de referencia para las variaciones de tensión de estado estable, tal como se indica en la Tabla 2.4

Tabla 2.4

Límites de variación de tensión para sistemas generales

Tipo de sistema	Tolerancia de variación de tensión
General	+10%, -10%

Nota: Elaboración propia a partir de (ICONTEC, 2008)

2.3.1.1.2 Sistemas que alimenten equipos electrónicos

Las variaciones de tensión en el sistema son analizadas de acuerdo con las recomendaciones de la norma NTC 1340 (ICONTEC, 2013), en la cual se establecen límites para variaciones de tensión, tal como se indica en la Tabla 2.5

Tabla 2.5

Clasificación, denominación y valores de tensión nominal.

Clasificación	Máxima (% de la nominal)	Mínima (% de la nominal)
Baja Tensión $V_n < 1 \text{ Kv}$	+5	Clientes Urbanos: -8 Clientes Rurales: -10

Nota: Elaboración propia a partir de (ICONTEC, 2013)

2.3.1.2 Desequilibrio de tensión

De acuerdo con la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), para circuitos urbanos, el 99% de los valores de desequilibrio de tensión evaluados deben estar dentro de los valores de referencia; y para circuitos rurales, el 95%, tal como se indica en la Tabla 2.6

Tabla 2.6

Porcentaje máximo de desequilibrio de tensión

Rango de tensión	Valor de referencia [%]
Tensión nominal $< 69 \text{ kV}$	2,0
Tensión nominal $\geq 69 \text{ kV}$	1,5

Nota: Elaboración propia a partir de (ICONTEC, 2008)

2.3.2 Análisis de contenidos armónicos

Los armónicos son analizados con base en la norma IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014), mediante el cálculo de los índices de distorsión de las variables eléctricas.

2.3.2.1 Índices para armónicos de tensión

En condiciones normales de operación, se deben calcular los percentiles al 95% de los valores de distorsión armónica individual y la distorsión armónica total de tensión, en porcentaje de la tensión a frecuencia fundamental. En la Tabla 2.7 se establecen estos límites.

Tabla 2.7

Límites de distorsión armónica de tensión

Rango de tensión [kV]	Distorsión armónica individual de tensión D_v [%]	Distorsión armónica total de tensión THDV [%]
$V_n < 1$	5,0	8,0
$1 < V_n \leq 69$	3,0	5,0
$69 < V_n \leq 161$	1,5	2,5
$V_n > 161$	1,0	1,5

Nota: Elaboración propia a partir de (D. Committee et al., 2014)

2.3.2.2 Índices para armónicos de corriente

La norma IEEE Std 519 (D. Committee et al., 2014), establece los límites admisibles para la distorsión armónica de corriente según la tolerancia del sistema a la deformación de la onda de tensión provocada por la alimentación de corrientes a diferentes frecuencias en el punto de conexión común; esta característica es medida por medio del parámetro “ I_{sc}/I_L ”, donde:

I_{sc} , es la mínima corriente de corto circuito trifásica que se tenga disponible para hacer la evaluación en el punto de conexión común.

I_L , es la corriente de demanda máxima en el punto de conexión común.

En la Tabla 2.8 se muestran los límites para el contenido de armónicos de corriente en sistemas con tensiones entre 120V y 69kV.

Tabla 2.8

Límites de distorsión de demanda de corriente para sistemas con tensiones de 120 V hasta 69 kV

Isc/IL	Armónicos individuales (%)				TDD (%)
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	5
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	8
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	12
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	15
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	20

Nota: Elaboración propia a partir de (D. Committee et al., 2014)

2.3.3 Análisis de carga

Para la evaluación de cargabilidad de los transformadores de potencia se evalúa el porcentaje máximo de carga admisible de acuerdo a la presencia de armónicos como lo recomienda la norma IEEE C57.110 (T. Committee & Society, 1986).

2.3.4 Análisis del factor de potencia

El factor de potencia es evaluado en el punto de conexión común con respecto a la posibilidad de generar un costo adicional para la empresa caso de estudio según los parámetros establecidos en el capítulo 12 resolución 015-2018 (CREG, 2018), la cual establece que se realizará el cobro del costo de transporte de energía reactiva según las siguientes condiciones:

- Un usuario final registra en su frontera comercial un consumo de energía reactiva inductiva superior al cincuenta por ciento de la energía activa (kWh) que le es entregada en cada periodo horario.
- Cuando se registre en una frontera comercial el transporte de energía reactiva capacitiva, independientemente del valor de energía activa, se cobrará sobre la totalidad de energía reactiva registrada.

2.3.5 Análisis de frecuencia

Este análisis se realiza orientado a detectar la variación de frecuencia que se presenta en la red que alimenta las cargas. En la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), establece los límites tolerables de variación de frecuencia para los tipos de redes contemplados, tal como se indica en la Tabla 2.9

Tabla 2.9

Valores de referencia de variaciones de frecuencia

Tipo de red	Frecuencia aceptable durante el 95% de los datos tomados de una semana	Frecuencia aceptable durante el 100% de los datos tomados de una semana
Redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado	Todos mayores a 59,8 Hz y todos menores a 60,2 Hz	Todos mayores a 57,5 Hz y todos menores a 63 Hz
Redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado (redes de distribución en regiones no interconectadas e islas)	Todos mayores a 59,8 Hz y todos menores a 60,2 Hz	Todos mayores a 51 Hz y todos menores a 69 Hz

Nota: Elaboración propia a partir de (ICONTEC, 2008)

2.3.6 Indicación de eventos

Los eventos registrados en los puntos de instalación de los equipos son analizados con base en la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008), a fin de establecer la clasificación de la perturbación de calidad de potencia según su duración.

2.4 Caracterización estadística de los datos.

Debido a la naturaleza variable de la carga se realizó la caracterización estadística de los parámetros medidos según se recomienda en las normas (ICONTEC, 2008) y (D. Committee et al., 2014). Para el análisis estadístico se determinó para cada parámetro los valores mínimo,

máximo y promedio, posibilitando construir una imagen apropiada de la distribución relativa del grupo de datos. Además, se obtuvo la función de distribución de probabilidad para identificar el porcentaje de los datos que sobrepasan los límites establecidos (Sousa et al., 2017).

2.5 Identificación de indicadores fuera de los límites establecidos.

Se definen las conformidades y no conformidades en circuitos analizados a partir de la caracterización estadística y la comparación con los límites de cada parámetro.

3 Capítulo 3: Resultados de la caracterización de la calidad de la energía en el caso de estudio.

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de los datos medidos en cada punto de medición y el análisis de los resultados.

3.1 Resultados en el punto de conexión común.

En la Tabla 3.1 se presenta el resumen de los registros en este punto de medición. La conexión del equipo fue realizada en el bloque de pruebas de la celda del medidor de energía.

Tabla 3.1

Resumen de los resultados registrados en punto de conexión común

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	29,57
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	15.864,00
Variación superior de tensión con respecto a 13.800 V [%]	14,9
Variación inferior de tensión con respecto a 13.800 V [%]	-0,7
Desequilibrio de tensión máximo [%]	1,25
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	628,2
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	346,8
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	-317,3

Potencia aparente máxima [kVA]	829,3
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	4,86
Distorsión total de demanda de corriente máxima [%]	13,28

Nota: Elaboración propia

A continuación, se describen los resultados de cada parámetro.

3.1.1 Análisis de tensión

3.1.1.1 Análisis de variación de tensión

En la Tabla 3.2 se comparan los registros de variación con los límites establecidos por la norma

Tabla 3.2

Valores registrados de variación de tensión

Parámetro	Variación [%]	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Variación superior	14,9	No cumple	+10
Variación inferior	-0,7	Cumple	-10

Nota: Elaboración propia

Con base en una tensión de referencia de 13.800 V, la variación superior de tensión se encuentra por fuera del límite admisible establecido en la norma NTC5001 (ICONTEC, 2008).

3.1.1.2 Análisis de desequilibrio de tensión

En la Tabla 3.3 se compara el registro de desequilibrio con el límite establecido por la norma

Tabla 3.3

Valor registrado desequilibrio de tensión

Parámetro	Desequilibrio [%] (percentil 95%)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Desequilibrio	1,25	Cumple	2

Nota: Elaboración propia

El desequilibrio de tensión se encuentra por debajo del límite establecido en la norma NTC5001 (ICONTEC, 2008).

3.1.2 Análisis de contenidos armónicos

3.1.2.1 Análisis de armónicos de tensión

En la Tabla 3.4 se muestra el resultado de la distorsión armónica registrada.

Tabla 3.4

Resultado del análisis de índices de armónicos de tensión

Parámetro	Distorsión armónica de tensión [%] (Percentil 95%)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Distorsión armónica total de tensión	2,18	Cumple	5
Distorsión individual armónico 3	0,28	Cumple	3
Distorsión individual armónico 5	1,63	Cumple	3
Distorsión individual armónico 7	2,02	Cumple	3
Distorsión individual armónico 9	0,15	Cumple	3
Distorsión individual armónico 11	0,40	Cumple	3
Distorsión individual armónico 13	0,24	Cumple	3
Distorsión individual armónico 15	0,08	Cumple	3
Distorsión individual armónico 17	0,13	Cumple	3
Distorsión individual armónico 19	0,10	Cumple	3
Distorsión individual armónico 21	0,06	Cumple	3

Nota: Elaboración propia

Los índices de distorsión armónica total e individual de tensión, se encuentran dentro de los límites admisibles según lo recomendado por la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

3.1.2.2 Análisis de armónicos de corriente

En la Tabla 3.5 se muestran los límites de las distorsiones armónicas total e individual.

Tabla 3.5

Límites de armónicos de corriente en punto de conexión común

Punto de Registro	IL[A]	Isc[kA]	Isc/IL	Límite Aplicable [%]			
				$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	TDD
Punto de conexión común	27,9	2,53	90,6	10	4,5	4,0	12,0

Nota: Elaboración propia

Estos límites fueron obtenidos con base en el valor máximo de corriente de demanda correspondiente a 27,9 A y al valor de corriente de corto circuito 2,53 kA.

En la Tabla 3.6 se muestra el resultado del análisis de distorsión armónica de corriente durante el periodo de registro:

Tabla 3.6

Resultado del análisis de armónicos de corriente

Parámetro	Distorsión armónica de corriente [%] (Percentil 95 %)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Distorsión total demanda de corriente	6,4	Cumple	12,0
Distorsión de corriente armónico 3	1,1	Cumple	10,0
Distorsión de corriente armónico 5	4,4	Cumple	10,0
Distorsión de corriente armónico 7	5,1	Cumple	10,0
Distorsión de corriente armónico 9	0,7	Cumple	10,0
Distorsión de corriente armónico 11	1,5	Cumple	4,5
Distorsión de corriente armónico 13	1,1	Cumple	4,5
Distorsión de corriente armónico 15	0,4	Cumple	4,5
Distorsión de corriente armónico 17	1,1	Cumple	4,0
Distorsión de corriente armónico 19	0,8	Cumple	4,0
Distorsión de corriente armónico 21	0,3	Cumple	4,0

Nota: Elaboración propia

Los índices de distorsión armónica total e individual de corriente, se encuentran dentro de los límites admisibles según lo recomendado por la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

3.1.3 Análisis del factor de potencia

3.1.3.1 Análisis de Registros

El perfil de factor de potencia se observa en la Figura 3.1

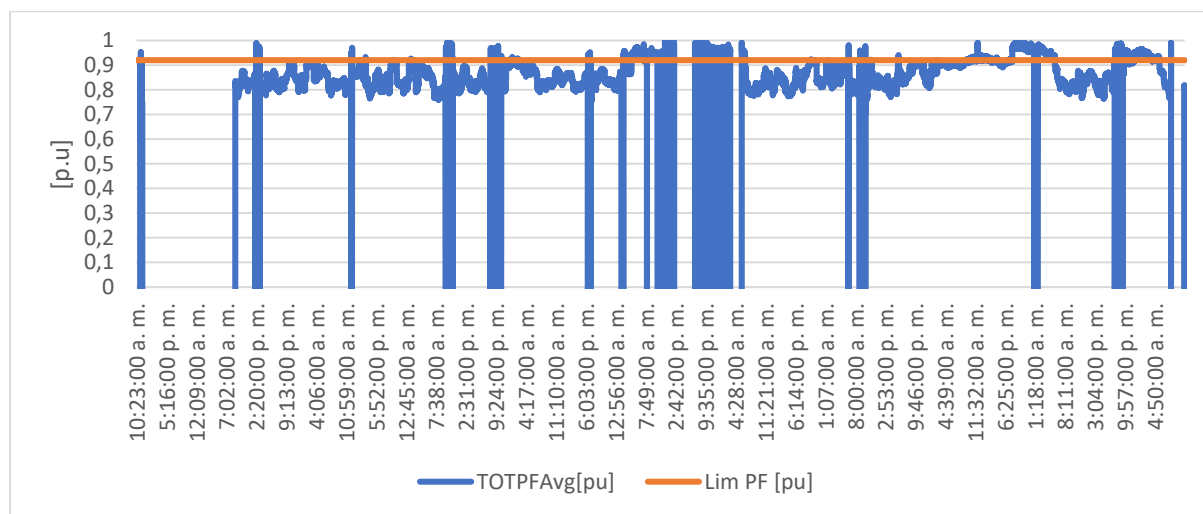


Figura 3.1 Perfil factor de potencia frontera comercial. Elaboración propia.

Según los datos registrados se obtuvo que el factor de potencia se mantiene por fuera del rango recomendado por resolución CREG 015-2018 (CREG, 2018) durante el 69% del tiempo de registro, lo cual ocasiona penalizaciones por consumo de energía reactiva en exceso.

Cabe resaltar que, del tiempo obtenido fuera del rango recomendado, 9% corresponde a factor de potencia capacitivo (el cual genera penalización en su totalidad) y 91% a factor de potencia inductivo (el cual genera penalización únicamente cuando dentro de un periodo de una hora, el consumo de energía reactiva es mayor al 50% del consumo de energía activa).

3.1.4 Análisis de frecuencia

En la Tabla 3.7 se comparan los valores del registro de frecuencia con los límites establecidos.

Tabla 3.7

Resultado análisis frecuencia

Porcentaje mínimo de registros requeridos el rango [%]	Porcentaje de registros obtenidos en el rango [%]	Cumplimiento	Límite de frecuencia [Hz]
100	100	Cumple	57,5 - 63
95	99	Cumple	59,8 - 60,2

Nota: Elaboración propia

Los valores obtenidos durante el periodo de registro se encuentran dentro de los rangos permitidos por la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008).

3.2 Resultados en los transformadores de distribución.

En la Tabla 3.8 se presenta el resumen de los registros en este punto de medición. Además, se muestran las gráficas de tendencia de los principales parámetros eléctricos registrados, con el fin de analizar si los datos obtenidos durante la medición se encuentran dentro de los límites establecidos en las normas.

Tabla 3.8

Resumen de los resultados registrados en transformador de 250 kVA

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	345,90
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	253,17
Variación superior de tensión con respecto a 228 V [p.u]	1,11
Variación inferior de tensión con respecto a 228 V [p.u]	-0,23
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	1,08
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	111,83
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	60,28
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	-20,60
Potencia aparente máxima [kVA]	118,28
Mediciones de Armónicos	

Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	4,86
Distorsión total de demanda de corriente máxima [%]	13,28

Nota: Elaboración propia

3.2.1 Análisis de tensión

3.2.1.1 Análisis de variación de tensión

En la Figura 3.2 se compara la variación de tensión con los límites establecidos.

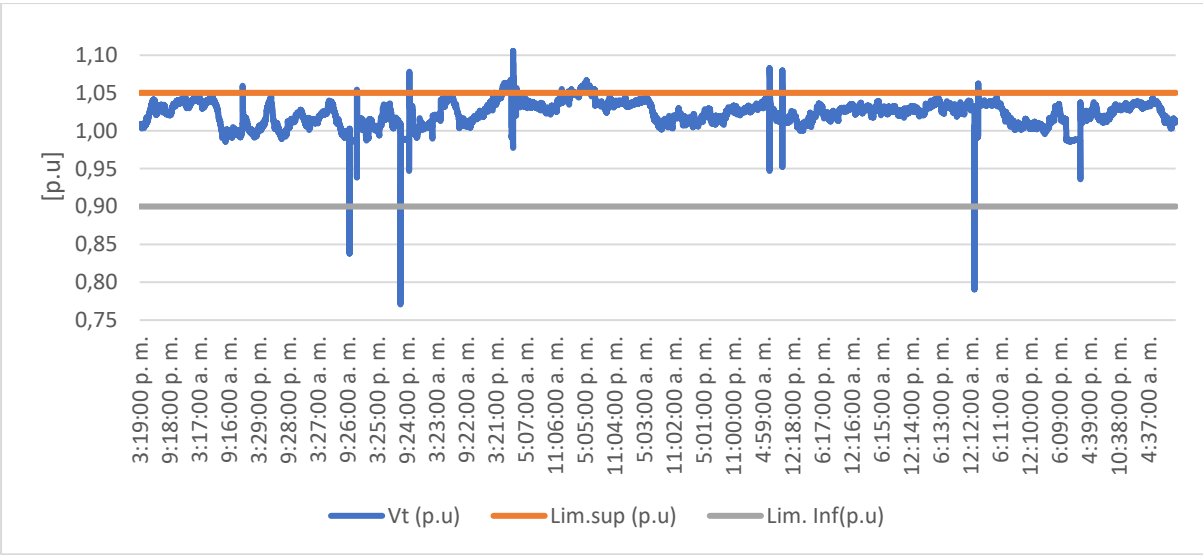


Figura 3.2 Variación de tensión vs límites establecidos por la norma. Elaboración propia.

En la Tabla 3.9 se comparan los registros de variación con los límites establecidos por la norma

Tabla 3.9

Valores registrados de variación de tensión

Parámetro	Variación [p.u]	Cumplimiento	Límite admisible [p.u]
Variación superior	1,11	No cumple	1,05
Variación inferior	0,77	No cumple	0,90

Nota: Elaboración propia

Con base en una tensión de referencia de 228 V, la variación superior e inferior de tensión se encuentran por fuera del límite admisible establecido en la norma NTC1340 (ICONTEC, 2013).

3.2.1.2 *Análisis de desequilibrio de tensión*

En la Figura 3.3 se compara la variación de tensión con los límites establecidos

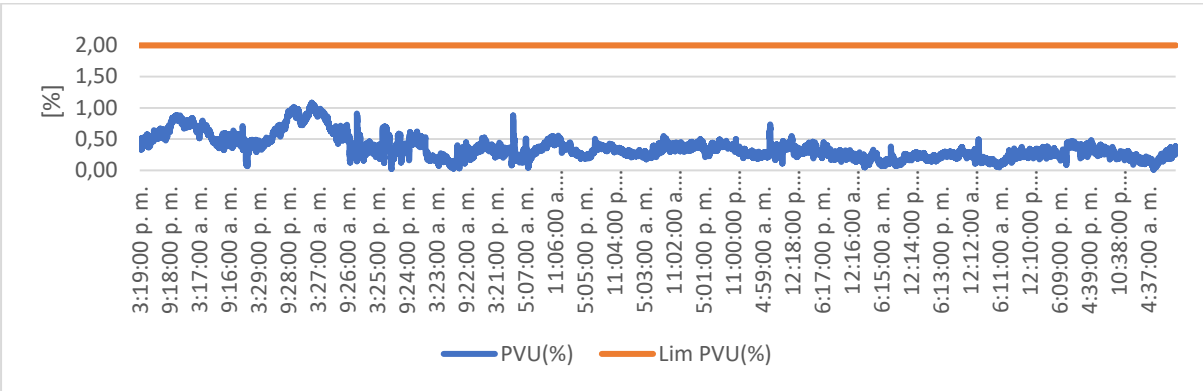


Figura 3.3 Desequilibrio de tensión de línea. Elaboración propia.

En la Tabla 3.10 se compara el registro de desequilibrio con el límite establecido por la norma

Tabla 3.10

Valor registrado desequilibrio de tensión

Parámetro	Desequilibrio [%] (percentil 95%)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Desequilibrio	1,08	Cumple	2

Nota: Elaboración propia

El desequilibrio de tensión se encuentra por debajo del límite establecido en la norma NTC5001 (ICONTEC, 2008).

3.2.2 Análisis de contenidos armónicos

La norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014) establece los límites de contenidos armónicos para el punto de conexión común, como no se han definido límites para los transformadores de distribución, se utilizan como referencia los únicos límites conocidos.

3.2.2.1 Análisis de armónicos de tensión

En la Figura 3.4 se comparan los valores obtenidos de distorsión armónica total de las señales de tensión con el límite establecido.

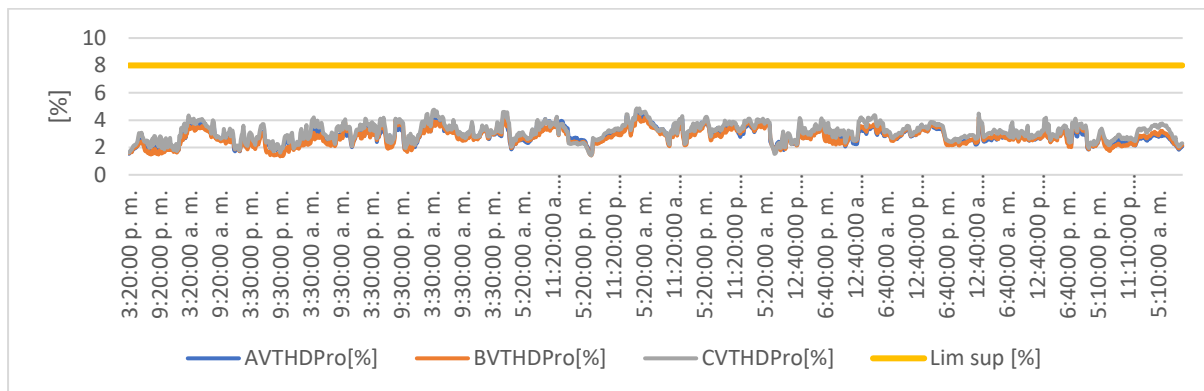


Figura 3.4 Distorsión armónica total en tensión. Elaboración propia.

Se encuentra que los valores de distorsión armónica total están por debajo del límite 8%.

En la Figura 3.5 se comparan los valores obtenidos de distorsión armónica individual de las señales de tensión con el límite establecido.

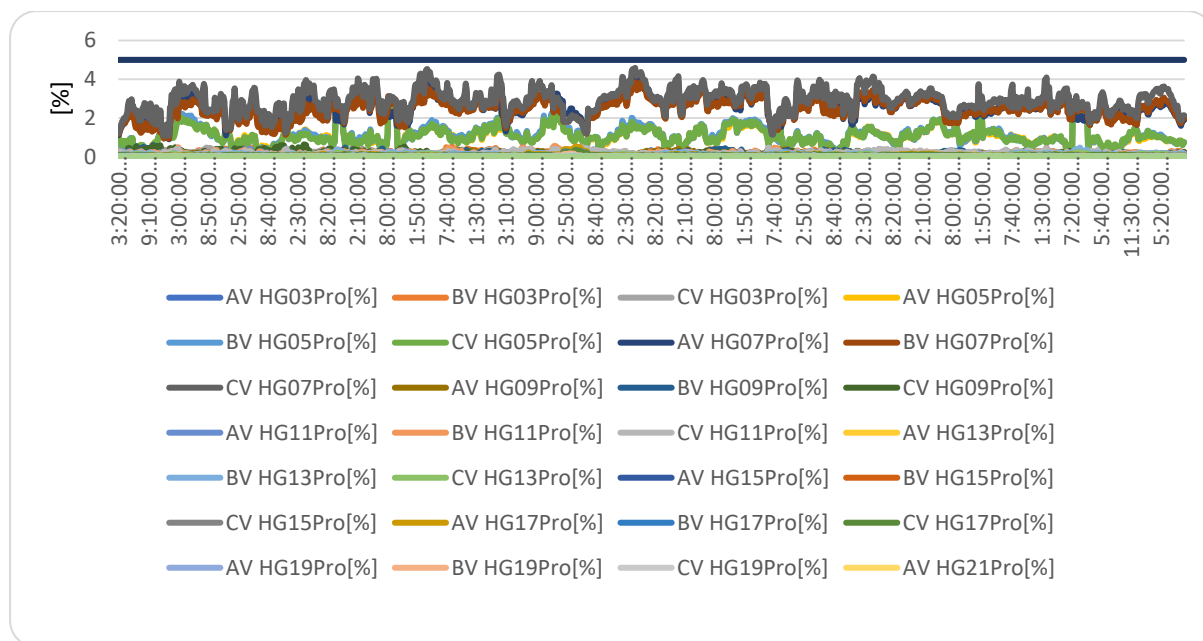


Figura 3.5 Armónicos individuales de tensión. Elaboración propia.

Se encuentra que los valores de distorsión armónica individual están por debajo del límite 5%.

En la Tabla 3.11 se muestra el resultado del análisis de las distorsiones armónicas durante el periodo de registro.

Tabla 3.11

Resultado del análisis de índices de armónicos de tensión

Parámetro	Distorsión armónica de tensión [%] (Percentil 95%)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Distorsión armónica total de tensión	4,86	Cumple	8
Distorsión individual armónico 3	0,53	Cumple	5
Distorsión individual armónico 5	2,72	Cumple	5
Distorsión individual armónico 7	4,59	Cumple	5
Distorsión individual armónico 9	0,64	Cumple	5
Distorsión individual armónico 11	0,56	Cumple	5
Distorsión individual armónico 13	0,47	Cumple	5

Distorsión individual armónico 15	0,11	Cumple	5
Distorsión individual armónico 17	0,54	Cumple	5
Distorsión individual armónico 19	0,17	Cumple	5
Distorsión individual armónico 21	0,04	Cumple	5

Nota: Elaboración propia

Los registros se encuentran por debajo del límite recomendado en el estándar IEEE 519-2014 (D. Committee et al., 2014).

Se realiza comparativo para determinar el orden de armónico individual de tensión más significativo, se muestra en la Figura 3.6

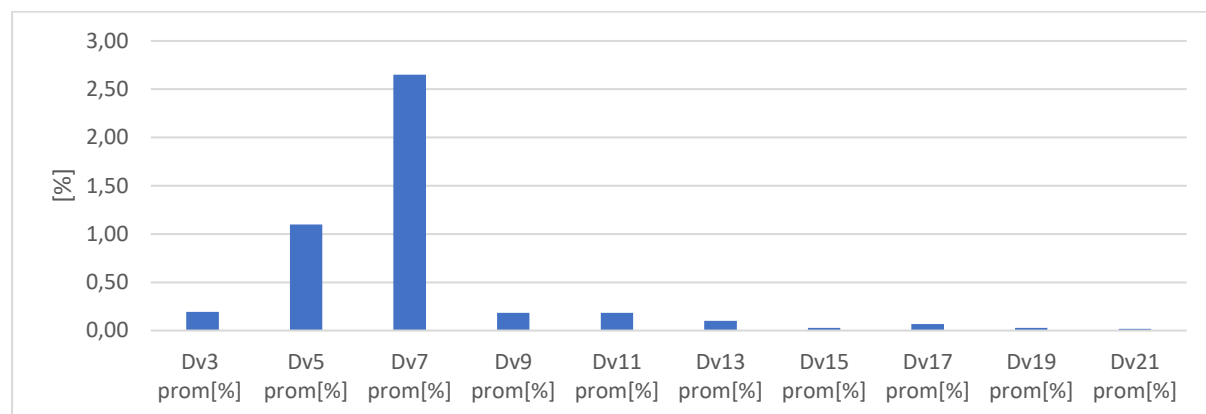


Figura 3.6 Promedio por orden de armónicos individuales de tensión. Elaboración propia.

Se determina el armónico 7 como el más significativo. Es un armónico de secuencia positiva. Los armónicos de voltaje incrementan las pérdidas de núcleo en motores y transformadores del sistema eléctrico (Sousa et al., 2017). Las pérdidas causadas por este armónico no son tan significativas como las que se obtendrían al tener mayor presencia de armónicos de secuencia negativa, tales como el quinto orden, que causaría que el campo rotatorio generado se oponga al sentido de giro, reduciendo el par de arranque y la eficiencia de los motores (AESoluciones, 2014).

3.2.2.2 *Análisis de armónicos de corriente*

En la Figura 3.7 se comparan los valores obtenidos de distorsión de demanda total de las señales de corriente.

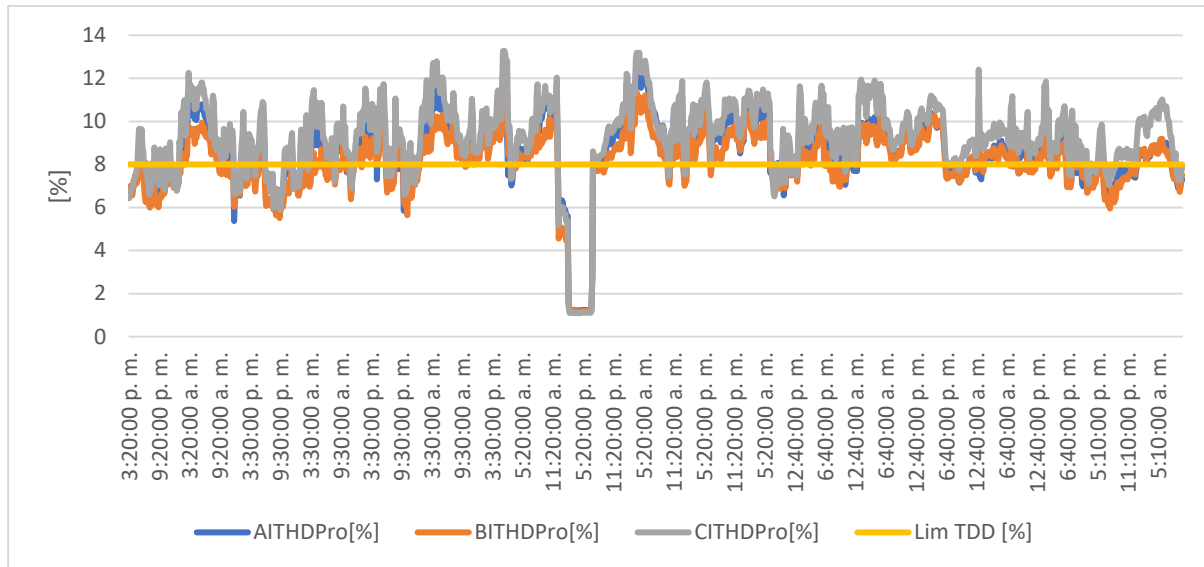


Figura 3.7 Distorsión de demanda en corriente. Elaboración propia.

Se encuentra que el 70,73% de los valores registrados de distorsión de demanda total están por encima del límite 8%, lo permitido en la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

En la Figura 3.8, Figura 3.9 y Figura 3.10 se comparan los valores obtenidos de armónicos individuales de corriente con los límites establecidos para cada rango de orden según la norma.

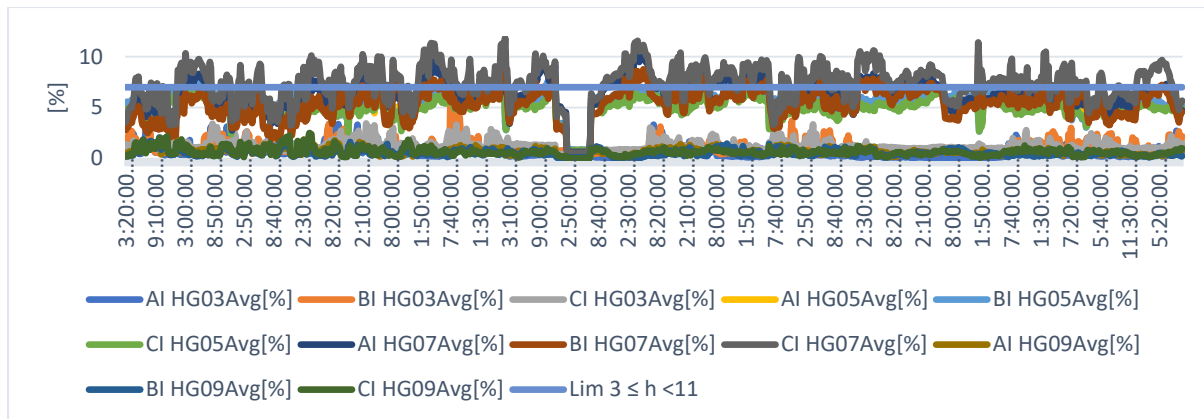


Figura 3.8 Armónicos individuales de corriente orden $3 \leq h < 11$. Elaboración propia.

Se determina que el 9,60% de los valores registrados están por encima del límite 7%, lo permitido en la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

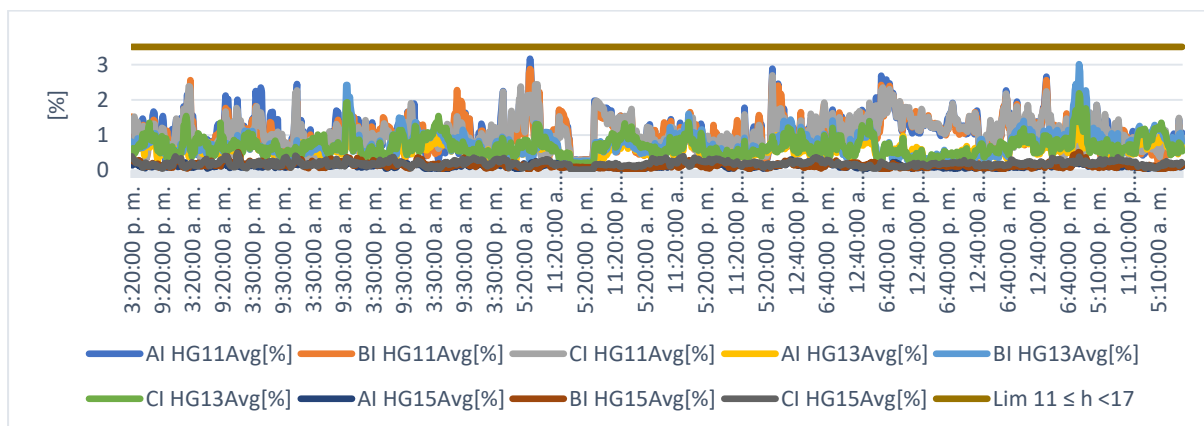


Figura 3.9 Armónicos individuales de corriente orden $11 \leq h < 17$. Elaboración propia.

Se determina que el 100% de los valores registrados están por debajo del límite 3,5%, lo permitido en la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

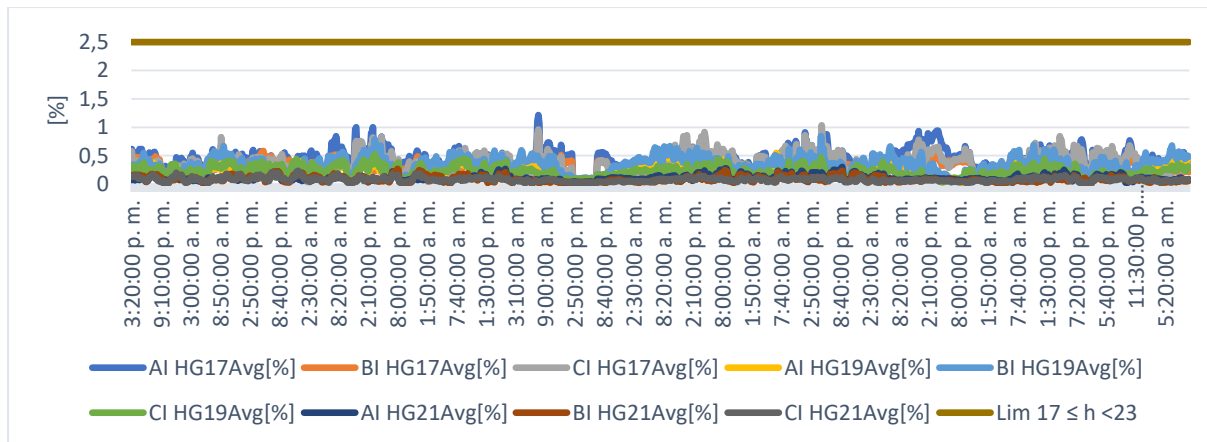


Figura 3.10 Armónicos individuales de corriente orden $17 \leq h < 23$. Elaboración propia.

Se determina que el 100% de los valores registrados están por encima del límite 2,5%, lo permitido en la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

En la Tabla 3.12 se muestra el resultado del análisis de distorsión de demanda total de corriente y armónico individual de corriente durante el periodo de registro.

Tabla 3.12

Resultado del análisis de armónicos de corriente

Parámetro	Distorsión armónica de corriente (Percentil 95 %)	Cumplimiento	Límite admisible [%]
Distorsión de demanda de corriente	13,28	No Cumple	8
Distorsión de corriente armónico 3	5,33	Cumple	7
Distorsión de corriente armónico 5	7,76	No Cumple	7
Distorsión de corriente armónico 7	11,86	No Cumple	7
Distorsión de corriente armónico 9	2,50	Cumple	7
Distorsión de corriente armónico 11	3,17	Cumple	3,5
Distorsión de corriente armónico 13	3,01	Cumple	3,5
Distorsión de corriente armónico 15	0,51	Cumple	3,5
Distorsión de corriente armónico 17	1,21	Cumple	2,5
Distorsión de corriente armónico 19	0,84	Cumple	2,5
Distorsión de corriente armónico 21	0,30	Cumple	2,5

Nota: Elaboración propia

Para la evaluación de los índices de distorsión armónica total e individual de corriente, se consideran los valores de referencia indicados en la Tabla 3.13

Tabla 3.13

Límites de armónicos de corriente

Punto de Registro	IL[A]	Isc[kA]	Isc/IL	Límite Aplicable [%]			
				$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	TDD
TRF 250 kVA	345,9	15,366	44,42	7	3,5	2,5	8,0

Nota: Elaboración propia

Estos resultados fueron obtenidos con base en el valor máximo de demanda corriente correspondiente a 345,9 A y a la corriente de cortocircuito 15,366 kA.

En la Tabla 3.14 se muestran los rangos según el orden individual de armónicos y se compara con el límite permitido en el estándar:

Tabla 3.14

Rango según el orden individual de armónicos de corriente

Rango según el orden individual de armónicos	Distorsión armónica de corriente [%] (Percentil 95 %)	Cumplimiento	Limite [%]
$3 \leq h < 11$	11,86	No Cumple	7
$11 \leq h < 17$	3,17	Cumple	3,5
$17 \leq h < 23$	1,21	Cumple	2,5

Nota: Elaboración propia

En la Figura 3.11 se muestran los promedios por orden de armónicos individuales.

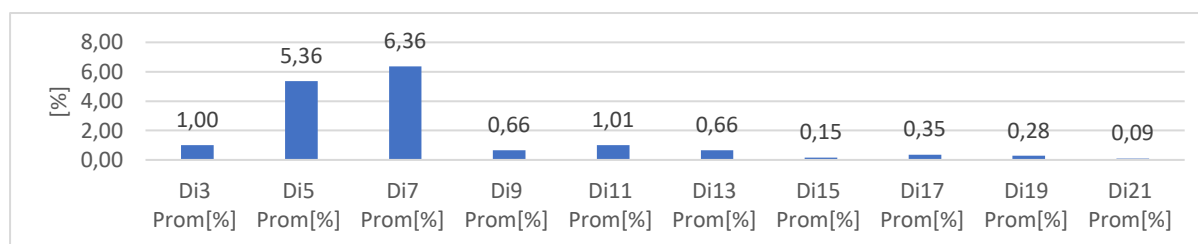


Figura 3.11 Promedio por orden de armónicos individuales de corriente. Elaboración propia

Se determina el armónico de séptimo orden como el más significativo. Es un armónico de secuencia positiva. Los armónicos de corriente incrementan pérdidas en el devanado y estructura de los componentes del sistema eléctrico (Sousa et al., 2017). Habitualmente se ignoran por debajo de los 300Hz, sin embargo, en el caso del séptimo armónico, el efecto piel adquiere una notable importancia causando calentamiento excesivo de los conductores (AESoluciones, 2014).

3.2.3 Análisis de carga

3.2.3.1 Análisis de consumo de corriente

En la Figura 3.12 se muestra la tendencia de corriente durante el periodo de medición.

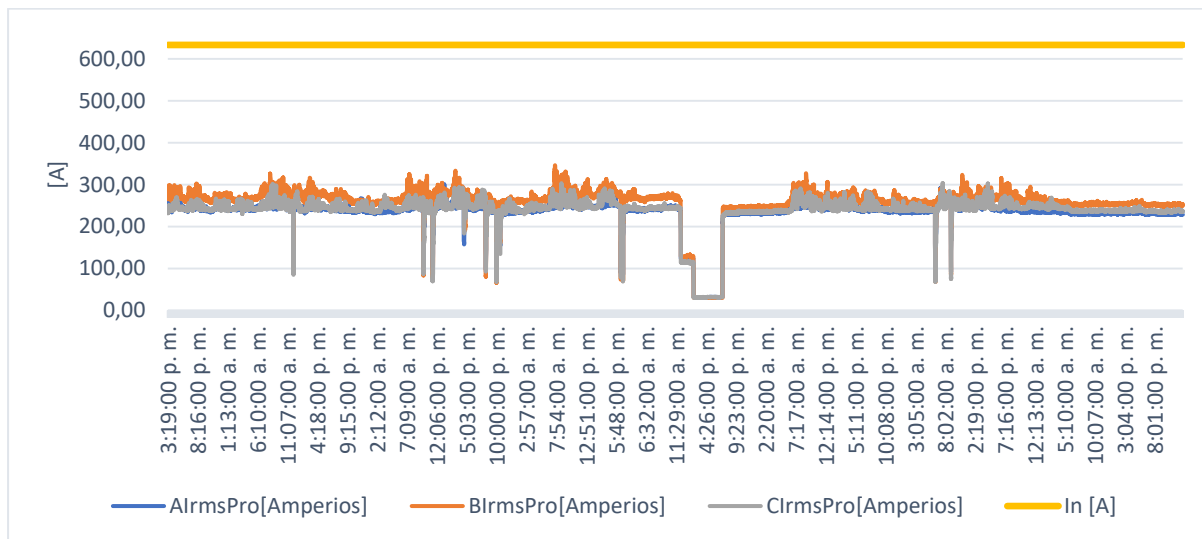


Figura 3.12 Consumo de corriente durante el periodo de medición. Elaboración propia.

El consumo promedio de corriente total registrado durante el período de medición fue de 244,83A y el valor máximo de consumo fue 345,90A.

3.2.3.2 Análisis de consumo de potencia

Se evidencia el comportamiento de la potencia activa, reactiva y aparente en la Figura

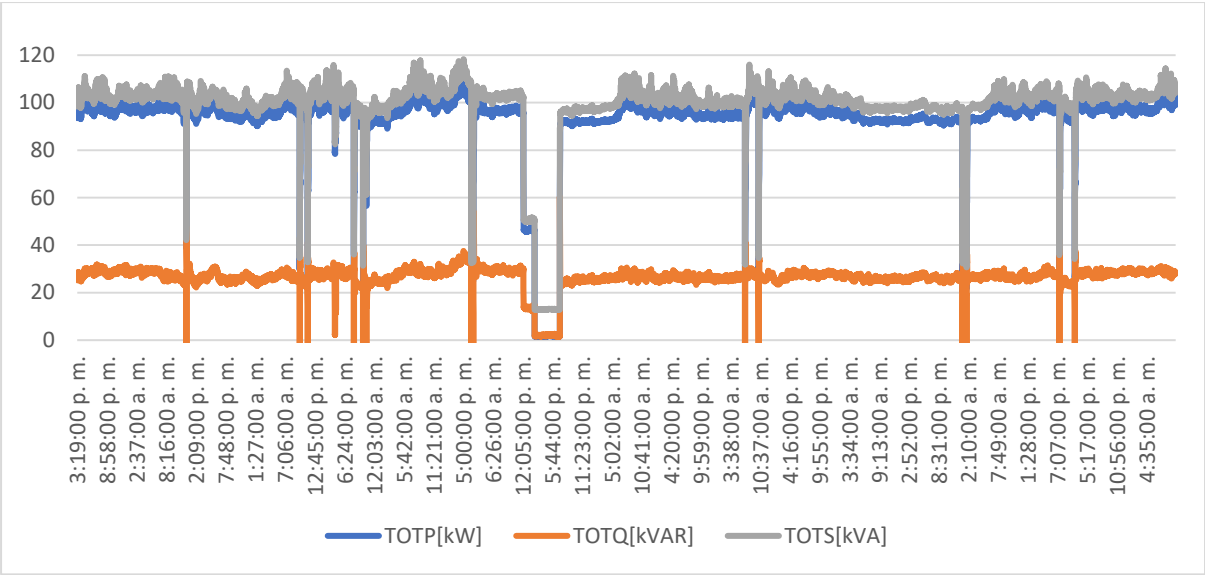


Figura 3.13 Consumo de potencia activa, reactiva y aparente. Elaboración propia.

En la Tabla 3.15 se muestran los valores máximos de potencia activa, reactiva y aparente total registrada durante el período de medición.

Tabla 3.15

Valores máximos de potencia registrados

Mediciones de Potencia	Potencia total
Potencia activa [kW]	111,83
Potencia reactiva inductiva [kVAR]	60,28
Potencia reactiva capacitiva [kVAR]	-20,60
Potencia aparente [kVA]	118,28

Nota: Elaboración propia

3.2.4 Análisis de factor de potencia

La Figura 3.14 muestra el comportamiento del factor de potencia durante el periodo de medición.

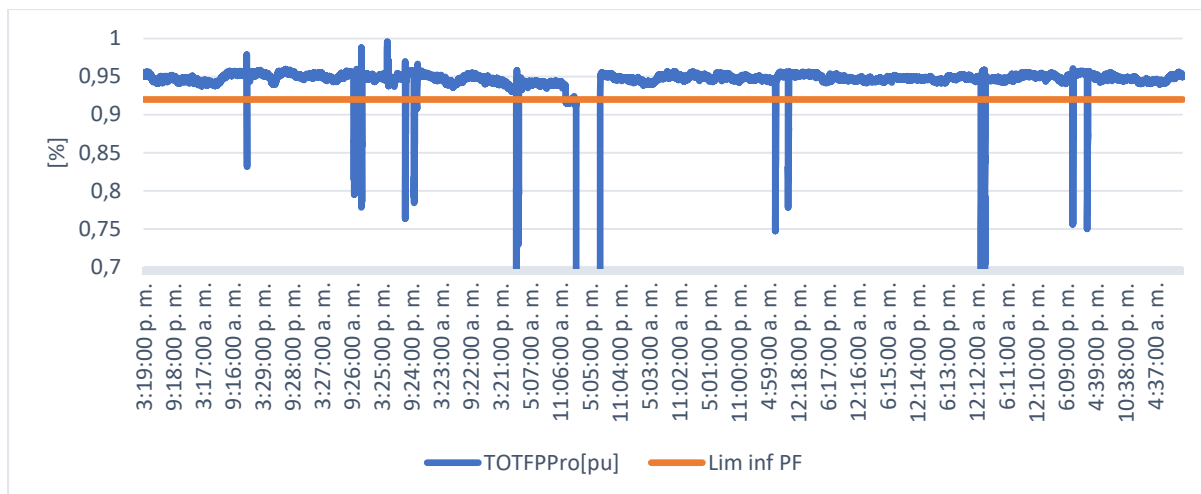


Figura 3.14 Tendencia de factor de potencia. Elaboración propia.

Se evidenció que los valores promedios de factor de potencia promedios se encuentran por encima de 92% inductivo, valores que cumplen el límite establecido por la resolución CREG 015 (CREG, 2018). Se debe tener en cuenta que en algunos registros el factor de potencia disminuye por debajo del 92% inductivo en repetidas ocasiones, pudiendo ser penalizable.

3.2.5 Análisis de frecuencia

Se muestra en la Figura 3.15 la tendencia de la frecuencia durante el periodo de medición.

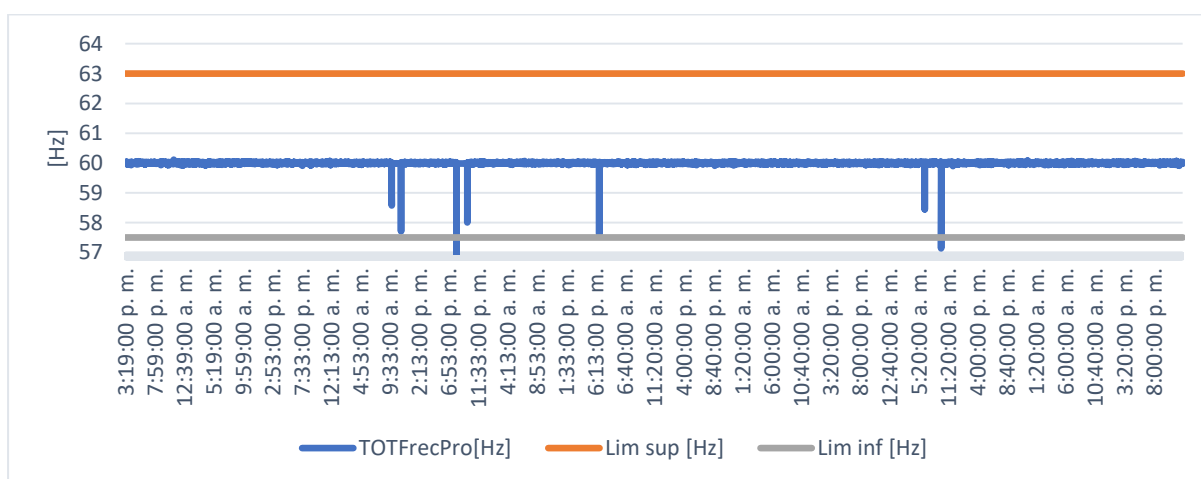


Figura 3.15 Tendencia de frecuencia. Elaboración propia.

Durante la medición se registró un valor máximo de 60,11 Hz y un valor mínimo de 53,46 Hz.

En la Tabla 3.16 se comparan los valores del registro de frecuencia con los límites establecidos.

Tabla 3.16

Resultado análisis frecuencia

Porcentaje mínimo de registros requeridos el rango [%]	Porcentaje de registros obtenidos en el rango [%]	Cumplimiento	Límite de frecuencia [Hz]
100	99,96	No cumple	57,5 - 63
95	99,92	Cumple	59,8 - 60,2

Nota: Elaboración propia

Los valores obtenidos durante el periodo de registro se encuentran dentro de los rangos permitidos por la norma NTC 5001 (ICONTEC, 2008).

A continuación, se resume los resultados de los otros transformadores de distribución. En la Tabla 3.17. En los Anexos 1 - 11 se muestran las tablas de los resultados.

Tabla 3.17

Valores máximos registrados en transformadores de distribución.

Parámetros	TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN											
	TRF principal 3MVA	TRF 250 kVA	TRF de Servicios 45 kVA	TRF Central Monitoreo 30 kVA	TRF 75 kVA técnico	TRF 10 kVA	TRF 75 kVA Cocina	TRF 112,5 kVA	TRF 75 kVA Dobladora #1	TRF 75 kVA #1 dobladora #2	TRF 75 kVA #2 dobladora #2	TRF 60 kVA técnico
Tensión Nominal [V]	460	228	225	226	225	225	225	225	225	225	224	225
Variación superior de tensión [%]	11,12	11,04	17,3	10,0	16,91	17,2	16,63	16,12	17,82	17,75	17,62	17,0

Variación inferior de tensión [%]	-4,86	-23,18	-4,51	-13,3	-9,72	-9,38	-9,92	-3,20	-9,83	-10,82	-9,83	-9,95
Desequilibrio de tensión [%]	1,20	1,08	1,27	1,77	1,24	1,40	1,14	1,16	1,19	1,14	0,71	1,16
Distorsión armónica total de tensión [%]	2,48	4,86	2,63	2,60	2,90	3,97	2,41	3,47	2,61	2,62	2,62	2,57
Distorsión individual armónico 3 [%]	0,33	0,53	0,06	0,59	0,42	0,67	0,26	0,54	0,36	0,36	0,30	0,32
Distorsión individual armónico 5 [%]	1,63	2,72	0,09	1,73	1,78	1,94	1,56	2,45	2,10	2,13	1,72	1,69
Distorsión individual armónico 7 [%]	2,44	4,59	0,12	1,88	2,57	3,42	2,15	2,98	2,61	2,70	2,38	2,33
Distorsión individual armónico 9 [%]	0,24	0,64	0,06	0,32	0,34	0,90	0,19	0,29	0,25	0,29	0,17	0,21
Distorsión individual armónico 11 [%]	0,39	0,56	0,07	0,43	0,50	1,05	0,33	0,76	0,46	0,46	0,38	0,37
Distorsión individual armónico 13 [%]	0,29	0,47	0,05	0,37	0,63	0,62	0,29	0,43	0,48	0,47	0,34	0,33
Distorsión individual armónico 15 [%]	0,12	0,11	0,05	0,44	0,19	0,29	0,10	0,33	0,14	0,15	0,11	0,12
Distorsión individual armónico 17 [%]	0,36	0,54	0,05	0,75	0,48	0,44	0,33	0,89	0,45	0,47	0,35	0,35
Distorsión individual armónico 19 [%]	0,26	0,17	0,04	0,71	0,36	0,40	0,24	0,37	0,32	0,33	0,28	0,27
Distorsión individual armónico 21 [%]	0,13	0,04	0,05	0,48	0,20	0,23	0,10	0,15	0,14	0,14	0,11	0,12
Corriente [A]	821,10	345,9	17,4	51,0	111	18,5	150,4	103,79	203,72	150,28	136,67	34,28
Distorsión total de demanda de corriente [%]	25,26	13,28	11,89	16,37	16,60	21,93	4,54	21,21	10,53	14,43	9,90	48,03
Distorsión de corriente armónico 3 [%]	0,60	0,99	0,73	3,23	0,29	5,48	0,92	5,69	0,15	1,80	4,05	4,40

Distorsión de corriente armónico 5 [%]	2,60	5,35	0,95	3,36	0,78	4,51	0,59	10,73	0,16	13,58	8,98	12,80
Distorsión de corriente armónico 7 [%]	3,53	6,36	0,60	0,34	1,70	4,55	1,02	9,19	0,13	4,21	3,42	4,74
Distorsión de corriente armónico 9 [%]	0,30	0,65	0,34	0,16	0,19	2,30	0,17	1,34	0,01	0,35	0,43	0,91
Distorsión de corriente armónico 11 [%]	0,77	1,01	0,45	0,21	0,29	2,30	0,13	3,56	0,02	1,36	1,14	2,51
Distorsión de corriente armónico 13 [%]	0,54	0,65	0,39	0,17	0,29	1,03	0,10	1,39	0,02	1,50	1,04	1,68
Distorsión de corriente armónico 15 [%]	0,19	0,15	0,27	0,19	0,14	0,55	0,06	0,91	0,00	0,19	0,47	0,45
Distorsión de corriente armónico 17 [%]	0,61	0,35	0,32	0,18	0,26	0,67	0,06	2,04	0,01	0,92	0,55	1,23
Distorsión de corriente armónico 19 [%]	0,39	0,27	0,28	0,15	0,22	0,46	0,05	0,96	0,01	0,41	0,43	0,85
Distorsión de corriente armónico 21 [%]	0,14	0,09	0,20	0,13	0,14	0,37	0,04	0,37	0,00	0,13	0,23	0,28
Potencia activa [kW]	557,90	111,83	3,75	13,16	38,86	6,19	44,81	28,19	17,80	35,77	27,84	9,75
Potencia reactiva Inductiva [kVAR]	298,30	60,28	5,38	7,32	10,09	1,36	28,62	15,62	26,44	32,98	34,77	8,83
Potencia reactiva capacitiva [kVAR]	-307,0	-20,60	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Potencia aparente [kVA]	634,20	118,28	6,49	15,71	39,31	6,49	54,05	31,21	32,28	49,33	43,94	11,72
Factor de potencia [p.u]	0,99	0,99	0,99	0,90	0,99	0,98	0,87	0,99	0,79	0,77	0,79	0,86
Carga actual transformador [%]	21,38	53,59	15,06	56,78	53,31	80,95	77,18	30,41	43,52	69,38	59,37	21,25
Registros de frecuencia [Hz]	60,11	60,11	64,99	61,40	60,26	60,11	60,11	60,11	60,49	60,21	60,09	60,10

Armónico más significativo	7	7	5	5	5	3	7	5	5	7	7	5
----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Como se observa en la Tabla 3.17 existe una deficiencia generalizada en cuanto a la variación de tensión para todos los puntos de medida objeto de este caso de estudio considerando los límites aceptables para sistemas generales con respecto a una tensión de referencia de 13,8 kV para el punto de conexión con el operador de red, y las tensiones nominales para los transformadores de distribución a baja tensión.

Los valores de desequilibrio de tensión son inferiores al valor máximo de referencia durante el 95% del tiempo registrado para todos los puntos de medida.

Tanto el índice de distorsión armónica total de tensión, como los índices de distorsión individual de tensión, se encuentran dentro de los límites admisibles por la norma durante la totalidad del tiempo de registro para todos los puntos de medida.

Los valores obtenidos de distorsión de demanda total de corriente y distorsión armónica individual de corriente, se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma para el punto de conexión común “Celda de medida frontera comercial”. Para el resto de transformadores de baja tensión se indica en la Tabla 3.19 un cumplimiento o no cumplimiento con respecto a la norma IEEE 519 (D. Committee et al., 2014).

Según la evaluación de cargabilidad realizada para los transformadores asociados a cada uno de los tableros de baja tensión, se identifica que el transformador de 75 kVA perteneciente al tablero dobladora #1 presenta un evento de arranque con una potencia máxima registrada de 76 kVA, el cual resultaría en una cargabilidad del 103% aproximadamente con respecto a su capacidad máxima, sin embargo, debido a que los registros fueron tomados con periodos de agregación de un (1) minuto, estos eventos cortos no reflejan correctamente la cargabilidad

#3 24/04/2019 11:10:00	Caída Temporal (9.000 V -	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#4 24/04/2019 14:03:00	Interrupción Sostenida (17,55 V - 60	Interrupción Sostenida (0,19 V - 60	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,4	NA	NA	NA	NA	NA
#5 25/04/2019 0:04:00	Interrupción Sostenida (18,07 V - 11	NA	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 14	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 14	NA	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 14	NA	Interrupción Temporal (0,07 V - 14	NA
#6 25/04/2019 0:17:00	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,07 V - 4,1	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 4,1	NA	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 4,1	NA	Interrupción Temporal (0,07 V - 4,1	NA
#7 25/04/2019 3:36:00	NA	Caída Instantánea (233,3 V -	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#8 25/04/2019 8:39:00	NA	Caída Temporal (248,9 V -	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#9 25/04/2019 11:32:00	NA	Caída Temporal (244,2 V -	Interrupción Momentánea (0,06 V - 0,4	NA	Interrupción Temporal (0,1 V - 14,6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#10 25/04/2019 18:50:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (132,7 V - 52 Min)	NA	NA	NA	NA	NA
#11 26/04/2019 9:49:00	Interrupción Sostenida (16,76 V - 90	Interrupción Sostenida (0,24 V - 90	Interrupción Temporal (0,06 V - 14	Interrupción Temporal (0,06 V - 14	Interrupción Temporal (0,1 V - 14	Interrupción Temporal (0,03 V - 14	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 14	Interrupción Temporal (0,2 V - 14	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 14	NA	Interrupción Temporal (0,06 V - 14	NA
#12 26/04/2019 11:20:00	NA	NA	Interrupción Temporal (0,05 V -	Interrupción Temporal (0,05 V - 3,9	Interrupción Temporal (0,1 V - 2,7	Interrupción Temporal (0,03 V - 4	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 4	Interrupción Temporal (0,18 V - 4	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 4	NA	Interrupción Temporal (0,05 V - 4	NA
#13 26/04/2019 16:31:00	Caída Instantánea (10.896 V -	Caída Instantánea (211,3 V -	Caída Instantánea (98,08 V -	Caída Instantánea (96,46 V -	Caída Instantánea (94,95 V -	Caída Instantánea (96,15 V -	Caída Instantánea (96,4 V -	Caída Instantánea (96,7 V -	Sobretensión (133 V - 35 Min)	NA	Caída Instantánea (96,9 V -	NA	Caída Instantánea (96,7 V -	NA

#14 26/04/2019 16:43:00	Caída Instantánea (11.966 V -	Caída Instantánea (248,7 V -	Caída Instantánea (105,7 V -	Caída Instantánea (104,6 V -	Caída Instantánea (100,9 V -	Caída Instantánea (103,5 V -	Caída Instantánea (104,1 V -	Caída Instantánea (104,1 V -	Caída Instantánea (104,1 V -	NA	NA	NA	Caída Instantánea (104,1 V -
#15 26/04/2019 20:08:00	Interrupción Sostenida (6,67 V - 105	Interrupción Sostenida (0,07 V - 105	Interrupción Temporal (0,06 V - 134	Interrupción Temporal (0,04 V - 15	Interrupción Temporal (0,2 V - 12,8	Interrupción Temporal (0,03 V - 14,6	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 14,6	Interrupción Temporal (0,16 V - 14,6	NA	Interrupción Temporal (0,027 V -	NA	Interrupción Temporal (0,05 V - 14,6
#16 26/04/2019 21:57:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (139,1 V - 32 Min)	NA	NA	NA	NA
#17 26/04/2019 22:30:00	Caída Momentánea (11.287 V -	Caída Momentánea (209,1 V -	NA	Caída Momentánea (108,1 V -	Caída Momentánea (98,4 V - 0,52	NA	Caída Momentánea (107,2 V -	Caída Momentánea (106,9 V -	Caída Momentánea (106,5 V - 0,4	NA	NA	NA	Caída Momentánea (107,2 V -
#18 27/04/2019 17:06:00	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (132,2 V - 20 Min)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#19 27/04/2019 18:29:00	Interrupción Sostenida (12,84 V - 40	Interrupción Sostenida (0,17 V - 40	Interrupción Sostenida (0,10 V - 8	Interrupción Temporal (0,06 V - 14	Interrupción Temporal (0,09 V - 12,7	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,7	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,7	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,7	Interrupción Temporal (0,2 V - 13,7	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,7	Interrupción Temporal (0 V - 13,7 Seg)	Interrupción Temporal (0,06 V - 13,7
#20 27/04/2019 19:10:00	Sobretensión (15,406 V - 13 Min)	NA	NA	Sobretensión (146,8V - 5 Min)	Interrupción Sostenida (0,09 V - 3	Sobretensión (147,8V - 12 Min)	Sobretensión (148,7 V -12 Min)	Sobretensión (147,3 V -12 Min)	NA	NA	NA	NA	NA
#21 27/04/2019 19:17:00	NA	NA	NA	Sobretensión (144 V - 5 Min)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#22 27/04/2019 20:22:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (148,5 V - 6 Horas)	NA	NA	Sobretensión (143,05 V - 59 Min)	NA
#23 27/04/2019 23:17:00	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (139,9 V - 3 Horas)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#24 28/04/2019 1:10:00	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (149,3 V - 1 Hora)	Sobretensión (155,3 V - 1 Hora)	Sobretensión (148,6 V - 46 Min)	NA	NA	NA	NA	NA

#35 02/04/2019 1:47:00	NA	NA	Interrupción Temporal (0,06 V - 3,7	Interrupción Temporal (0,05 V - 3,7	Interrupción Temporal (0,1 V - 2,7	Interrupción Temporal (0,03 V - 4	Interrupción Temporal (0,01 V - 4	Interrupción Temporal (0,02 V - 4	Interrupción Temporal (0,2 V - 4	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 4	Interrupción Temporal (0 V - 4 Seg)	Interrupción Temporal (0,06 V - 4
#34 02/04/2019 1:13:00	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (134,3 V - 1 Minuto)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
#33 02/04/2019 1:02:00	Interrupción Sostenida (16,04 V - 45	Interrupción Sostenida (0,15 V - 45	Interrupción Temporal (0,07 V - 14	Interrupción Temporal (0,05 V - 14	Interrupción Temporal (0,1 V - 14	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,4	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,4	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,4	Interrupción Temporal (0,17 V - 13,4	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,3	Interrupción Temporal (0 V - 13,3 Seg)	Interrupción Temporal (0,05 V - 13,3
#32 01/04/2019 8:58:00	NA	NA	NA	Interrupción Sostenida (0,04 V - 8	NA	NA	NA	Interrupción Sostenida (10,7 V - 11	NA	NA	Interrupción Sostenida (0,09 V - 8	Interrupción Sostenida (0 V - 11 Horas)	NA
#31 30/04/2019 8:56:00	Interrupción Sostenida (21,39 V - 8	Interrupción Sostenida (0,28 V - 8	Interrupción Sostenida (0,21 V - 79	Interrupción Temporal (0,04 V - 13,9	Interrupción Temporal (0,1 V - 13,9	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,9	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,9	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,9	NA	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,9	Interrupción Temporal (0 V - 13,9 Seg)	Interrupción Temporal (0,05 V - 13,9
#30 30/04/2019 6:20:00	Interrupción Momentánea (16,69 V -	Interrupción Momentánea (0,24 V -	Interrupción Momentánea (0,06 V - 6,7	Interrupción Momentánea (0,04 V - 6,7	Interrupción Momentánea (0,1 V - 9	Interrupción Momentánea (0,03 V - 5	Interrupción Momentánea (0,1 V - 0,5	Interrupción Temporal (0,05 V - 5	NA	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 5,6	Interrupción Temporal (0 V - 5,6 Seg)	Interrupción Temporal (0,06 V - 5,6
#29 30/04/2019 12:50:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0 V - 13,7 Seg)	NA	NA	NA
#28 29/04/2019 21:53:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (153,31 V - 3 Horas)	NA	NA	NA
#27 29/04/2019 17:06:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,01 V - 13,7	NA	NA	NA
#26 28/04/2019 2:15:00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,02 V - 13,9	Interrupción Temporal (0,2 V - 13,9	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,4	Interrupción Temporal (0 V - 13,4 Seg)	Interrupción Temporal (0,05 V - 13,4
#25 28/04/2019 1:51:00	Aumento Temporal (15.688 V -	NA	NA	Aumento Temporal (149,6 V - 46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Sobretensión (150,3 V - 42 Min)	NA

#36 02/04/2019 19:30:00	Interrupción Sostenida (7,37 V - 106	Interrupción Sostenida (0,07 V - 106	Interrupción Sostenida (0,06 V - 16	Interrupción Temporal (0,05 V - 14,6	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 14,6	Interrupción Temporal (0,02 V - 14,6	Interrupción Temporal (0,02 V - 14,6	Interrupción Temporal (0,2 V - 14,6	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 14,6	Interrupción Temporal (0 V - 14,6 Seg)	Interrupción Temporal (0,06 V - 14,6
#37 03/04/2019 12:00:00	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,05 V - 13,8	Interrupción Temporal (0,1 V - 14,8	NA	NA	NA	Interrupción Temporal (0,17 V - 14,8	NA	Interrupción Temporal (0,03 V - 13,8	Interrupción Temporal (0 V - 13,9 Seg)	NA

Nota: Elaboración propia

Según la Tabla 3.18, se puede observar que para todos los puntos de medida se presentan eventos de tensión que pueden afectar el funcionamiento de los equipos electrónicos; algunos de estos eventos se reflejan directamente en el punto de conexión con el operador de red, resultado de eventos en la red eléctrica y otros son propios de los transformadores debido a operaciones programadas por personal de la planta o el funcionamiento de las cargas conectadas a los mismos.

3.3 Identificación de indicadores fuera de los límites.

En la Tabla 3.19 se presenta un resumen de los resultados, donde el término de verificación (C) significa conformidad con los límites establecidos por las normas y el término (NC), indica no conformidades en el parámetro evaluado.

Tabla 3.19

Resumen del análisis de variables de calidad

Punto de registro	Tensión nominal (V)	Variación de tensión	Desequilibrio o de tensión	Armónicos de tensión	Armónicos de corriente	Factor de potencia	Cargabilidad	Frecuencia
Punto de conexión común	13.800	NC	C	C	C	NC	C	C

Transformador principal	460	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 250 kVA	228	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador central de monitoreo	226	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador de servicios	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 10 kVA	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 75 kVA técnico	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 75 kVA cocina	225	NC	C	C	C	NC	C	C
Transformador 75 kVA dobladora #1	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 75 kVA #1 dobladora #2	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 75 kVA #2 dobladora #2	224	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 112,5 kVA	225	NC	C	C	NC	NC	C	C
Transformador 60 kVA	225	NC	C	C	NC	NC	C	C

Nota: Elaboración propia

En la *Tabla 3.19* se observa que, en todos los transformadores analizados, los niveles de contenidos armónicos de tensión, desequilibrio, cargabilidad y frecuencia se encuentran dentro de los límites establecidos, mientras que los índices de variación de tensión y factor de potencia se encuentran fuera de los límites. Por otro lado, se pudo demostrar que, en el punto de conexión común, se cumple con los límites de distorsión total de demanda de corriente, sin embargo, en 11 transformadores de distribución, se observaron no conformidades.

Conclusiones

El estudio realizado permitió la caracterización de la calidad de la energía de un sistema eléctrico de una industria especializada en metalmecánica con predominio de cargas eléctricas variables no lineales. La importancia del estudio se basó en que en esta industria se han presentado daños en tarjetas electrónicas, banco de condensadores y cableado de puesta a tierra.

En el estudio se aplicaron pasos secuenciales que permitieron la caracterización de la calidad de la energía en el transformador del punto de conexión común y en los doce transformadores de distribución de la planta. Se emplearon analizadores de redes de clase A y se aplicaron criterios basados en estudios reportados por la literatura científica y las normas nacionales e internacionales de calidad de la energía.

Como resultado de la caracterización realizada, se demostró que, en todos los transformadores analizados, los índices de variación de tensión y factor de potencia se encuentran fuera de los límites por lo cual se recomienda la instalación de banco de condensadores para evitar penalización por parte del operador de red. Se pudo demostrar que, en 11 transformadores de distribución, se observaron no conformidades en relación con los límites de distorsión total de demanda de corriente.

Se pudo evidenciar que el armónico individual de corriente de quinto orden (secuencia negativa) predominó en seis transformadores, los armónicos individuales de corriente del séptimo orden (secuencia positiva) predominaron en cinco transformadores, y los armónicos individuales de corriente del tercer orden (secuencia cero), fueron los más recurrentes en un transformador.

Las no conformidades identificadas en el comportamiento de la calidad de la energía pueden afectar la operación de tarjetas electrónicas, motores eléctricos y transformadores, por lo tanto, se le sugiere a la empresa realizar acciones correctivas para mitigar estos problemas.

Referencias

- AESoluciones. (2014). *AESoluciones. 2014. “AESoluciones. 2014. ‘Los Efectos De Los Armónicos Y Sus Soluciones.’ : 10. Aesoluciones@aes.Com.Los Efectos De Los Armónicos Y Sus Soluciones.” : 10. aesoluciones@aes.com.luciones. 2014. “Los Efectos De Los Armónicos Y Sus Solucio. 10. aesoluciones@aes.com*
- Aramwanid, P., & Boonyaroonate, I. (2015). Power quality impact study and analysis of electrical power efficacy in sugar industry. *ECTI-CON 2015 - 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 9–12. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2015.7206958>
- Bhagavathy, P., Latha, R., & Elango, S. (2018). A Case Study on the Impact of Power Quality Analysis in Textile Industry. *2018 13th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2018 - Proceedings*, 978, 453–456. <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2018.8721407>
- Bishop, M. T. (1996). Evaluating harmonic-induced transformer heating. *IEEE Power Engineering Review*, 16(1), 56–57.
- Boonseng, C., Chompoo-inwai, C., Kinnares, V., Nakawiwat, K., & Apiratikul, P. (2001). Failure analysis of dielectric of low voltage power capacitors due to related harmonic resonance effects. *Proceedings Second International Conference on Properties and Applications*, 3, 1003–1008.
- Carrera, E., & Ordoñez, F. (2011). *Análisis De Calidad De Energía En Tagsa*.
- Cervantes, O. (2014). *METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BASE A NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA LA*

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC (Vol. 1, Issue 4).

- Chen, W., & Cheng, Z. (1988). An experimental study of the damaging effects of harmonics in power networks on the capacitor dielectrics. *Proceedings Second International Conference on Properties and Applications*, 2, . 645-648.
- Choi, W., Lee, W., Han, D., & Sarlioglu, B. (2018). New Configuration of Multifunctional Grid-Connected Inverter to Improve Both Current-Based and Voltage-Based Power Quality. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6374–6382.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2861737>
- Churio Silvera, O., Vanegas Chamorro, M., & Valencia Ochoa, G. (2018). Estudio y diagnóstico de la calidad de la energía de un campus universitario en la costa norte de Colombia. *AVANCES: Investigación En Ingeniería*, 15(1), 271–285. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4739>
- Committee, D., Power, I., & Society, E. (2009). IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, 2009(June), 1–81. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>
- Committee, D., Power, I., & Society, E. (2014). *IEEE Std 519 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society Sponsored by the Transmission and Distribution Committee I. 2014.*
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Committee, T., & Society, I. P. E. (1986). An American National Standard IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. *ANSI/IEEE Std C57.110-1986, December*, 0_1.

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.81682>

- CREG. (2018). Metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional. In *Resolución 015* (p. 239).
<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac?OpenDocument>
- De Abreu, J. P. G., & Emanuel, A. E. (2002). Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: Loss of useful life and its estimated cost. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1), 12–20. <https://doi.org/10.1109/28.980339>
- Digalovski, M., Najdenkoski, K., & Rafajlovski, G. (2013). Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase distribution transformer. *IEEE EuroCon 2013, July*, 1531–1535. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625181>
- Donolo, P., Bosio, G., De Angelo, C., Castellino, A., & Garcia, G. (2016). *Effects of voltage unbalance on IM power, torque and vibrations*. 140, 866–873.
- Dranetz. (2020). *Dranetz HDPQ Visa Plus*.
- Enríquez Harper, G. (2013). EL ABC de la calidad de la ENERGIA ELECTRICA. In *Profesor titular de la ESIME-IPN* (Vol. 0). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ICONTEC. (2008). *NTC 5001: Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común* (Issue 571).
- ICONTEC. (2013). *NTC 1340: Electrotecnia. Tensiones y frecuencia nominales en sistemas de energía eléctrica en redes de servicio público* (Issue 571).
- IEC. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement*

techniques – Power quality measurement methods.

- Inan, A., & Attar, F. (2000). Life Expectancy Analysis for an Electric Motor. *Proceedings Electrotechnical Conference*, 2, 997–999.
- Ingale, V. P., Jadhav, A. D., Takawale, N. K., & Mangate, S. D. (2018). Power Quality Analysis for Sugar Industry with Cogeneration. *Proceedings of the International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies, ICICCT 2018, Iccict*, 776–781. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8472949>
- Jafari Aghbolaghi, A., Mahdavi Tabatabaei, N., Boushehri, N. S., & Hojjati Parast, F. (2017). Reactive Power Control in AC Power Systems. In *Power Systems* (pp. 345–409). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51118-4>
- Jasinski, M., Sikorski, T., & Borkowski, K. (2018). Clusteringa tool to support the assessment of power quality in electrical power networks with distributed generation in the mining industry. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.101/j.eprsr.2018.09.020>
- Jiménez, A. F. S. (2015). *Guía metodológica para el análisis de hundimientos de tensión en el sistema de distribución de la CHEC*.
- Massey, G. W. (1994). Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(2), 485–489. <https://doi.org/10.1109/28.287505>
- Metrel, 2017. (2017). *Calidad de la energía Análisis de potencia , armónicos y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución*. 20. <https://doi.org/20750958>

- Metrel d.d. (2020). *MI 2892 Power Master Analizadores de la calidad de la energía*.
- Miguel Torres, Guianella Ibarra, E. B. (2004). *ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación*.
- Miron, A., Chindriș, M., & Cziker, A. (2012). Impact of unbalance in harmonic polluted power networks. *SPEEDAM 2012 - 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 674–678.
<https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2012.6264475>
- Monzón, M. (2013). *Calidad De Suministro Eléctrico: Huecos De Tensión. Mitigación De Sus Efectos En Las Plantas Industriales*.
- Movahed, S. R., Oraee Mirzamani, S. H., Rajabi, A., & Daneshvar, H. (2010). Estimation of insulation life of inverter-fed induction motors. *PEDSTC 2010 - 1st Power Electronics and Drive Systems and Technologies Conference*, 335–339.
<https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2010.5471797>
- Noriega, E., Cabello, J. J., Hernández, H., Sousa, V., Balbis, M., Silva, J. I., & Sagastume, A. (2019). Energy planning and management during battery manufacturing. *Gestao e Producao*, 26(4), 1–14. <https://doi.org/10.1590/0104-530X3928-19>
- Núñez, J. R., Pérez, Y., Benítez, I., & Noriega, E. (2021). Demilitarized network to secure the data stored in industrial networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(1), 611–619. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i1.pp611-619>
- Oraee, H. (2000). A quantative approach to estimate the life expectancy of motor insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(6), 790–796.

<https://doi.org/10.1109/94.891990>

Pierce, L. W. (1996). Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(3), 633–645.

<https://doi.org/10.1109/28.502176>

Raja, R., Yash, S., Shubham, S., Indragandhi, V., Vijayakmar, V., Saravanan, P., & Subramaniaswamy, V. (2020). *IoT embedded cloud-based intelligent power quality monitoring system for industrial drive application*. www.elsevier.com/locate/fgcs

Rajarajan, R., & Prakash, R. (2020). A reformed adaptive frequency passivness control for unified power quality compensator with model parameter ability to improve power quality. *Micropocessors and Microsystems*. www.elsevier.com/locate/micro

Rawa, M. J. H., Thomas, D. W. P., & Sumner, M. (2013). Power quality monitoring and simulation of a personal computer based on IEEE 1459-2010. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 671–675.

Rönnerberg, S., & Bollen, M. (2016). Power quality issues in the electric power system of the future. *Electricity Journal*, 29(10), 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.11.006>

Said, D. M., Nor, K. M., & Majid, M. S. (2010). Analysis of distribution transformer losses and life expectancy using measured harmonic data. *ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625403>

SECOVI. (2006). *Estudio de Calidad de Energía* ® SECOVI.

Shah, P., Hussain, I., Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2019). GI-Based control scheme for single-stage grid interfaced SECS for power quality improvement. *IEEE Transactions*

on Industry Applications, 55(1), 869–881. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2866375>

Singh, G. K. (2005). A research survey of induction motor operation with non-sinusoidal supply wave forms. *Power Generation and Propulsion, Electrical Vehicles*, 75, (2 3).
[https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(03\)80027-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(03)80027-9)

Souli, A., & Hellal, A. (2014). Design of a computer code to evaluate the influence of the harmonics in the Transient Stability studies of electrical networks. *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2014*, 107–112.
<https://doi.org/10.1109/SSD.2014.6808804>

Sousa, V., Herrera, H. H., Quispe, E. C., Viego, P. R., & Gómez, J. R. (2017). Harmonic distortion evaluation generated by PWM motor drives in electrical industrial systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(6), 3207–3216.
<https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3207-3216>

Sousa, V., Viego, P., Gómez, J., Lemozy, N., Jurado, A., & Quispe, E. (2015). Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1), 331–339.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2335994>

Strandt, A., Hu, J., & Wei, L. (2014). No-load power losses and motor overheating effects versus PWM switching frequencies. *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2014*, 280–283. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016570>

Wang, Y., Bai, B., & Liu, W. F. (2014). Research on discharging bearing currents of PWM inverter-fed variable frequency induction motor. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014*, 2945–2949.

<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7014000>

- Wang, Y., Liu, W., Chen, Z., & Bai, B. (2014). Calculation of high frequency bearing currents of PWM inverter-fed VF induction motor. *Proceedings - 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, IEEE PEAC 2014*, 51277122, 1428–1433. <https://doi.org/10.1109/PEAC.2014.7038074>
- Yadav, J. R., Vasudevan, K., Kumar, D., & Shanmugam, P. (2019). Power quality assessment for industrial plants: A comparative study. *Proceedings - 2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2019*. <https://doi.org/10.1109/CPE.2019.8862321>
- Yaghoobi, J., Abdullah, A., Kumar, D., Zare, F., & Soltani, H. (2019). Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry: A Review. *IEEE Access*, 7, 162500–162518. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950911>
- Zhu, B., Bai, B., & He, H. (2008). Effects of the inverter parameters on the eddy current losses in induction motor fed by PWM inverter. *Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2008*, 1, 4240–4243.

Anexos

Anexo 1 TRF PPAL 3 MVA

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	821,1
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	511,20
Variación superior de tensión con respecto a 460 V [p.u]	1,10
Variación inferior de tensión con respecto a 460 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	91,67
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	557.90
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	298.34
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	-307.02
Potencia aparente máxima [kVA]	634.20
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	500.30
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	25.26

Nota: Elaboración propia

Anexo 2 Central de monitoreo

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	51,04
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	242,14
Variación superior de tensión con respecto a 226 V [p.u]	1,06
Variación inferior de tensión con respecto a 226 V [p.u]	-0,17
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	2,55
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	13,16
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	7,32
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	15,71
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	603,72
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	16,37

Nota: Elaboración propia

Anexo 3 Transformador 10kVA

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	18,56
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	257,99
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,14
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	-0,12
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	1,42
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	2986,98
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	737,49
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	3400,32
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	222,61
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	21,93

Nota: Elaboración propia

Anexo 4 TRF 75kVA Cocina

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	150,4
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	256,60
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,14
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	-0,12
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	1,27
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	44,81
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	28,62
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	7,11
Potencia aparente máxima [kVA]	54,05
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	181,57
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	4,54

Nota: Elaboración propia

Anexo 5 TRF 75KVA CTECNICO

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	111,25
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	257,27
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,14
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	28,57
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	38,86
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	10,09
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	39,31
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	247,31
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	16,60

Nota: Elaboración propia

Anexo 6 TRF 60KVA CTECNICO

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	34,28
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	257,82
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,10
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	-0,67
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	99,93
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	9,75
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	8,83
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	11,72
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	300,81
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	48,03

Nota: Elaboración propia

Anexo 7 Transformador 112kVA

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	103,79
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	256,38
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,13
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	1,41
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	28,19
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	15,62
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	-0,13
Potencia aparente máxima [kVA]	31,21
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	4,18
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	21,21

Nota: Elaboración propia

Anexo 8 Tablero servicios 220V

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	17,45
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	258,60
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,14
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	10,97
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	3,75
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	5,38
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	-0,30
Potencia aparente máxima [kVA]	6,49
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	398,60
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	11,89

Nota: Elaboración propia

Anexo 9 TRF 75KVA DOBLADORA 1

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	111,25
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	257,27
Variación superior de tensión con respecto a 225V [p.u]	1,15
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	54,55
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	675.87
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	681.40
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	39,31
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	647.70
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	10.53

Nota: Elaboración propia

Anexo 10 TRF 75KVA DOBLADORA 2

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	136,67
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	259,14
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,15
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	0,78
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	27,84
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	34,77
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	43,94
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	457,31
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	9,90

Nota: Elaboración propia

Anexo 11 Dobladora_#2_Trafo_#1_75_kVA

Parámetros	
Mediciones de corriente	
Corriente de demanda máxima [A]	150,28
Mediciones de tensión	
Tensión máxima [V]	259,10
Variación superior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	1,15
Variación inferior de tensión con respecto a 225 V [p.u]	
Desequilibrio de tensión máximo [p.u]	38,46
Mediciones de Potencia	
Potencia activa máxima [kW]	35,77
Potencia reactiva inductiva máxima [kVAR]	32,98
Potencia reactiva capacitiva máxima [kVAR]	0,00
Potencia aparente máxima [kVA]	49,33
Mediciones de Armónicos	
Distorsión armónica total de tensión máxima [%]	564,36
Distorsión armónica total de corriente máxima [%]	14,43

Nota: Elaboración propia